

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

***CAPACIDAD DIAGNÓSTICA DEL ANÁLISIS DE RESPUESTA EN  
FRECUENCIA PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS***

**TUTOR:** Juan Manuel Martínez Tarifa

*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA*

**AUTOR:** Esther Ortega Serrano

*GRADO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA*



## Índice

Capítulo 1: Motivación y objetivos.....	5
Capítulo 2.- Degradación de transformadores de potencia y su caracterización. ....	9
2.1. Mecanismos de degradación más comunes en transformadores de potencia. ....	9
2.1.1. Humedad.....	9
2.1.2. Degradación del papel.....	10
2.1.3. Degradación del aceite.....	12
2.1.4. Esfuerzos electrodinámicos.....	13
2.2. Técnicas de medida para estimar el estado del transformador .....	14
2.2.1. Medida de la humedad .....	14
2.2.2. Grado de polimerización .....	15
2.2.3. Análisis de aceite.....	17
2.2.4. Análisis de respuesta dieléctrica .....	19
2.2.5. Medidas de la temperatura.....	27
2.2.6. Resistencia de aislamiento .....	27
Capítulo 3.- La aplicación del análisis de respuesta en frecuencia al diagnóstico de transformadores. ....	31
3.1. Introducción: ¿qué es y para qué sirve el Análisis de la Respuesta en Frecuencia (FRA)? .....	31
3.2. Modelos de transformador .....	32
3.2.1. Modelo de transformador en bajas frecuencias.....	32
3.2.2. Modelo de transformador en altas frecuencias.....	37
3.3. Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) .....	41
3.3.1. Teoría de FRA .....	42
3.3.2. Principio del ensayo .....	44
3.3.3. Aplicación .....	45
3.3.4. Tipos de prueba FRA. Tipos de prueba y conexiones.....	46
3.3.5. Rango de frecuencia de Interpretación.....	48
3.3.6. Metodología de interpretación de los resultados.....	48
3.3.7. Análisis y determinación de deformaciones en los arrollamientos .....	50
3.4. Capacidad diagnóstica del FRA: Ejemplos de diagnóstico de fallos. ....	51
3.4.1. Caso 1: BAGHERI [23] .....	51
3.4.2. Caso 2: ISLAM [24].....	55
3.4.3. Caso 3: ABU SIADA [25] .....	60

Capítulo 4: Medidas en transformadores. ....	73
4.1.- Procedimiento experimental. ....	73
4.1.1.- Características comunes a todas las medidas.....	73
4.1.2.- Conexionado para medida de funciones de transferencia. ....	74
4.1.3.- Conexionado para medida de impedancias.....	77
4.2.-Medidas en Transformador 1 .....	78
4.2.1.- Función de transferencia .....	78
4.2.2.- Medidas de Impedancia .....	89
4.3.- Medidas en Transformador 2 .....	91
4.3.1.- Función de transferencia .....	91
4.3.2.- Impedancias .....	98
Capítulo 5: Presupuesto: .....	102
Capítulo 6: Conclusiones .....	103
Bibliografía .....	105
ANEXO A .....	109
ANEXO B .....	112
B.1. Transformador 1 .....	112
B.1.1. Función de transferencia .....	112
B.1.2. Impedancia.....	125
B.2. Transformador 2 .....	130
B.2.1. Función de transferencia: .....	130
B.2.2. Impedancias .....	138

## Capítulo 1: Motivación y objetivos

Los transformadores de potencia son componentes indispensables de las centrales de generación de energía, los sistemas de transporte y las grandes plantas industriales. Los fallos inesperados en estas máquinas producen perturbaciones graves (Figura 1.1) en los sistemas de operación, lo que da lugar a paradas no programadas y problemas de suministro de energía. Estos fallos pueden ser el resultado de un mantenimiento deficiente, de un mal funcionamiento, de una protección deficiente, de averías no detectadas, o incluso de caída de rayos o de cortocircuitos graves. Los cortes de suministro afectan a los ingresos, provocan sanciones y pueden costar a una empresa su reputación y sus clientes.



Figura 1. 1. Transformador dañado por un fallo, que lo dejó casi destruido por completo y su posterior reparación. [1]

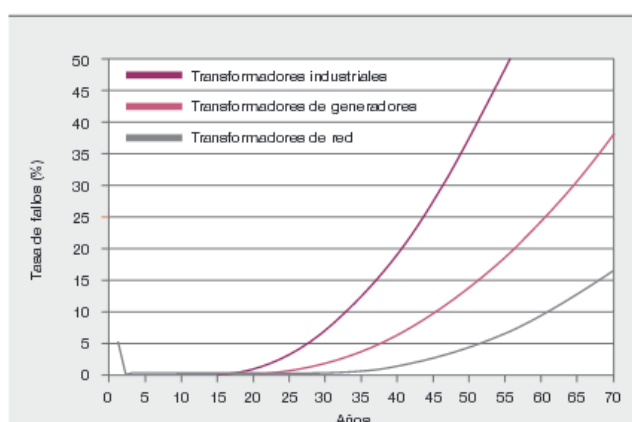
El Instituto de Operaciones de Energía Nuclear afirmó en 2002 que, desde 1996, más de 70 incidentes en centrales nucleares han tenido relación con transformadores de potencia grandes. Varios incidentes tuvieron una repercusión considerable sobre la central, y, además, más de 30 dieron lugar a disparos de emergencia de un reactor, paradas de planta y disminuciones del suministro eléctrico. Como resultado, en muchos casos, se perdió la producción y hubo costosas reparaciones [1].

Los enormes costes de los fallos de los transformadores de potencia proporcionan a las compañías de electricidad un buen incentivo para asegurar la fiabilidad y disponibilidad en todo el ciclo de vida de estos activos clave. El coste de estos transformadores oscila entre 2 y 4 millones de dólares y, en las contadas ocasiones en las que fallan, las consecuencias económicas son aún mayores; en casos extremos, incluso pueden dejar a una empresa al borde de la ruina (Tabla 1.1). Además, dado que la mayoría de los países tienen en vigor normativas estrictas para controlar y regular el suministro de energía, las penalizaciones por falta de suministro pueden llegar a ser 100 veces el precio de la propia energía.

**Tabla 1. 1. Estimaciones de costes de la sustitución imprevista de un transformador elevador típico de centrales.**  
[1]

Limpieza medioambiental	500.000 dólares
Pérdida de ingresos (500.000 dólares/día)	10 millones de dólares
Trabajos de instalación y puesta en servicio	100.000 – 300.000 dólares
Modificaciones adicionales y trabajos in situ	300.000 dólares
Nueva unidad de transformador	2-4 millones de dólares

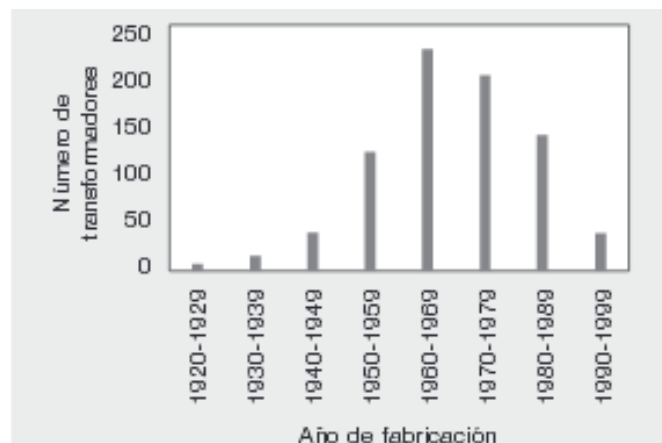
Aunque los transformadores se consideran equipos muy fiables, el actual parque mundial de transformadores es bastante antiguo. La edad media real de aquéllos en plantas industriales es de 30 años, y de 40 años en compañías eléctricas. Por esta razón, los porcentajes de fallo de estas máquinas y los costes de su sustitución y reparación correspondientes aumentan de forma lenta pero continua. Las curvas de evolución de riesgos presentan crecimientos más fuertes para las plantas industriales y las centrales de generación de energía, ya que en estas instalaciones los transformadores se suelen utilizar más intensamente [1]. Aunque la edad por sí sola no aumenta de forma determinante el riesgo de averías imprevistas, sí suele ser un indicador de este riesgo. El riesgo de fallo aumenta con otros factores, como el tipo de aplicación y la tendencia a cargar los transformadores al máximo para satisfacer las necesidades económicas de un entorno desregulado con mercados competitivos.



**Figura 1. 2. Tasa de fallos de un transformador en 3 aplicaciones diferentes. Se muestra la evolución del porcentaje de fallo de transformadores en plantas industriales (morado), en centrales de generación (rosa) y en redes de transporte (gris). [1]**

En la Figura 1.3 se muestra el máximo de inversiones en transformadores en las décadas de 1960 y 1970 de muchas empresas de Europa y Estados Unidos. La carga que supone el coste de sustitución de los equipos viejos ha obligado a muchas empresas a mantener los transformadores funcionando más allá de su vida recomendada para suavizar la punta de inversiones. Esto es posible sólo optimizando el mantenimiento de los transformadores y aplicando medidas que prolonguen su utilización. [1] Al mismo tiempo, las restricciones económicas exigen un mayor rendimiento de la inversión con presupuestos de mantenimiento y gastos menores. Los costes de mantenimiento están sometidos a una presión creciente

debido a la liberalización y la desregulación, que han fomentado un enfoque más basado en la rentabilidad. Como consecuencia, los operadores ya no pueden seguir una simple estrategia de mantenimiento basada en el tiempo, que reduce los riesgos haciendo todas las pruebas, cada cierto tiempo (fijo), y en todos los transformadores. Por el contrario, deben aplicar una estrategia de mantenimiento más sofisticada basada en el estado de los transformadores: hacer más mantenimiento en los transformadores de alto riesgo (entendiendo como riesgo, la probabilidad elevada de fallo o una repercusión importante de un fallo sobre los resultados de la empresa) que en los transformadores de bajo riesgo. Esto exige una información fiable sobre el estado de los transformadores [2].



**Figura 1. 3. Inversión en transformadores. Alcanzó un máximo entre 1960 y 1970. Sin estrategias optimizadas se producirá un segundo pico pasados unos 50 años. [1]**

Existen muchas técnicas para tratar de detectar mecanismos de degradación en transformadores. Una de ellas, es el análisis de respuesta en frecuencia (FRA), una técnica de diagnóstico muy poderosa y extendida, usada para identificar diferentes fallos incipientes en los transformadores de potencia. Como resultado de los repetidos esfuerzos mecánicos y eléctricos a los que está sometido, los devanados de un transformador se desplazan y deforman. Esto causa un cambio en las inductancias propias y mutuas y en las capacidades equivalentes de las secciones de los discos de los devanados. Como consecuencia, la respuesta en frecuencia de los devanados cambiará. Los cambios en la geometría del transformador, o en las propiedades dieléctricas del aislamiento debido al envejecimiento o al incremento de la cantidad de agua, también afectarán a la forma de la respuesta en frecuencia, sobre todo en frecuencias resonantes y en su amortiguación [3].

En este Trabajo de Fin de Grado lo que se pretende es, en primer lugar, exponer los mecanismos de degradación más comunes que tienen lugar en un transformador, junto con las técnicas de diagnóstico más empleadas para detectarlos. Posteriormente, se va a hacer una revisión de artículos y documentación publicada sobre el tema del Análisis de Respuesta en Frecuencia ("Frequency response analysis", FRA), ya que no existe una guía unificada ni accesible sobre ello, por lo que muchas veces puede resultar difícil hacerse una idea general de

en qué consiste la técnica, qué permite detectar y los avances que se han hecho en este campo.

Posteriormente, se aplicará el Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) a dos transformadores trifásicos ubicados en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Carlos III de Madrid. Se los someterá a barridos en frecuencia para hallar su función de transferencia con distintas configuraciones y también se graficarán sus impedancias. Una vez hecho esto, se analizarán los resultados y se intentará explicar las diferencias/similitudes que se encuentren en las gráficas; para ello se emplearán dos parámetros estadísticos de evaluación de similitudes entre curvas que se han encontrado en la bibliografía.



## **Capítulo 2.- Degradación de transformadores de potencia y su caracterización.**

### **2.1. Mecanismos de degradación más comunes en transformadores de potencia.**

El aislamiento eléctrico de equipos de alta tensión es el sistema más crítico para garantizar su operación fiable. Los transformadores de potencia se ven sometidos continuamente a esfuerzos eléctricos, térmicos y mecánicos que, solos, o en acción conjunta, pueden comprometer la vida de sus sistemas de aislamiento severamente. Por esta razón se debe conocer bien qué mecanismos de degradación pueden generar.

#### **2.1.1. Humedad.**

##### ***2.1.1.a. Consecuencias.***

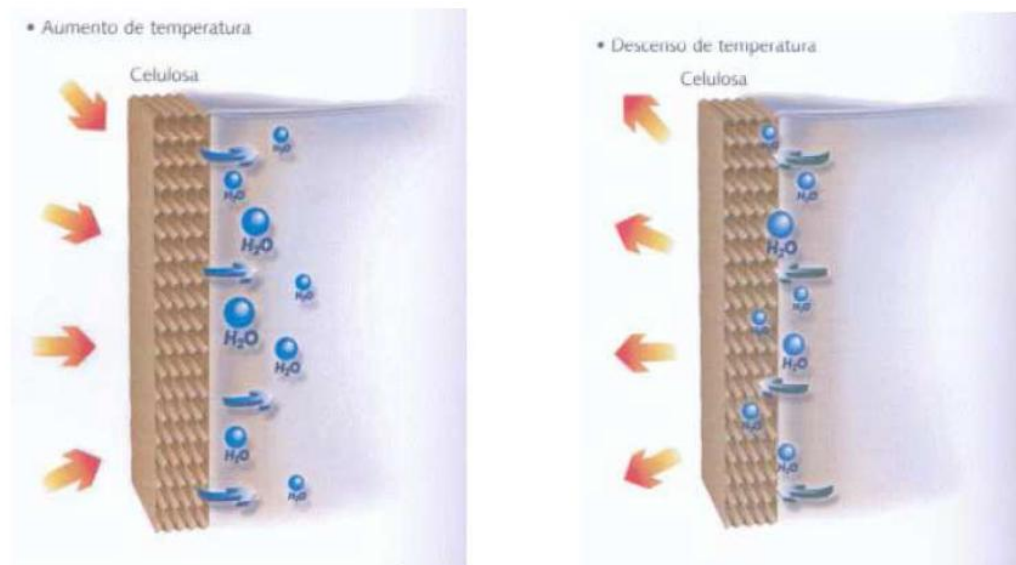
El sistema de aislamiento del transformador (aceite y papel) ha de soportar la presencia de humedad en su seno, cuyo origen es múltiple. La presencia de humedad en el aislamiento del transformador no solo altera el comportamiento del mismo, sino que además acelera su proceso de envejecimiento.

La presencia de humedad provoca una pérdida de rigidez dieléctrica y un aumento de la conductividad en el aislamiento, además de una pérdida de las propiedades mecánicas del papel. El agua en el aceite mineral de transformadores también conlleva el riesgo de que se formen burbujas cuando la absorción de agua por parte de la celulosa hace que aumente la concentración local de gases en el aceite. Esto puede dar lugar a la aparición de descargas parciales (ionizaciones de baja energía, pero responsables de cierto envejecimiento) e incluso arcos eléctricos.

Además de las causas intrínsecas derivadas de la calidad de los materiales, la aparición de humedad en el transformador puede deberse a cuestiones operacionales, como la penetración desde la atmósfera y el proceso de descomposición del papel aislante [4].

##### ***2.1.1.b. Dinámica de Humidificación***

El movimiento de la humedad en el transformador es producido por las variaciones en la temperatura, causando un intercambio de humedad entre el aislamiento sólido (papel/cartón) y líquido (aceite mineral). Como se aprecia en la figura 2.1, los calentamientos producen un fenómeno inverso a los enfriamientos, pero la velocidad del primer fenómeno es mayor que la del segundo [4]. Por eso en el aceite crece la concentración de agua con el envejecimiento del mismo.



**Figura 2. 1. Flujo de agua durante el calentamiento (izquierda) y enfriamiento (derecha) de un transformador. [4]**

Se considera que el contenido de agua en el aceite es uno de los principales indicadores de daño, y suele expresarse en términos de humedad relativa porcentual o en partes por millón (1ppm=1mg de agua/1kg de aislante). La humedad relativa del aceite es el contenido en agua disuelto en el aceite con respecto a la cantidad máxima de humedad que el aceite puede contener (nivel de saturación). El nivel de saturación a su vez depende de la presión, y muy especialmente de la temperatura. En un transformador nuevo, el contenido en humedad debe ser menor del 5% (porcentaje en peso) en el papel y menos de 5ppm en el aceite [4].

### **2.1.2. Degradación del papel.**

En los aislamientos sólidos, a diferencia de los líquidos y gaseosos confinados, no se presenta la regeneración total del dieléctrico después de la ruptura eléctrica, ni tampoco una renovación del dieléctrico.

Cuando se analiza la probabilidad de ruptura de un aislamiento sólido, hay que tener en cuenta que ésta depende directamente de las propiedades del material aislante (combinación de materias primas y calidad de proceso de fabricación) como también de otros tipos de mecanismos de degradación que se mencionan a continuación [4]:

- Inestabilidad química
- Oxidación
- Hidrolisis
- Migración de sustancias químicas activas
- Contaminación
- Deterioro electroquímico
- Temperatura excesiva
- Efecto del campo eléctrico

- Esfuerzos electrodinámicos (ver apartado 2.1.4)

Los principales síntomas de envejecimiento del papel son:

- Disminución del Grado de Polimerización (“Degree of Polymerization”, DP): la descomposición del papel aislante se traduce en una rotura de sus cadenas moleculares de polímero, que es evaluado mediante el DP. Durante la fabricación de un transformador, el DP del papel se encuentra entre un valor de 1000 y 1300; el secado del transformador lo reduce a un valor de 950, y el envejecimiento en servicio lo reduce a valores inferiores. Normalmente se considera que para un valor de DP inferior a 200, el papel ha perdido todas sus propiedades mecánicas y el estado del equipo es inaceptable para el servicio [4].
- Disminución de la rigidez dieléctrica.
- Disminución de sus propiedades mecánicas: la descomposición mecánica disminuye tanto la resistencia a la tracción como la flexibilidad, pudiendo llegar a quebrarse por la simple sollicitación de curvatura impuesta por los conductores. Por tanto, esfuerzos mecánicos moderados (ver sección 2.1.4) pueden romperlo fácilmente.



**Figura 2. 2. Fallo de aislamiento papel-aceite. [4]**

- Generación de productos de descomposición: la descomposición de la celulosa impregnada con aceite dentro de un transformador produce principalmente monóxido de carbono ( $CO$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), agua ( $H_2O$ ), y también algo de hidrogeno ( $H_2$ ) y metano ( $CH_4$ ). . Una temperatura excesiva causa la descomposición de la celulosa por la acción del calor, generando, aparte de los compuestos mencionados arriba, el 2-furfuraldehído (2-FAL), que en una pequeña parte pasa al aceite. Esto provoca la disminución del grado de polimerización del papel (el análisis de furanos se explicará más adelante en este capítulo, en la sección 2.2.3.b). Dado que la distribución de la temperatura no es uniforme, la parte del transformador que opera a mayor temperatura normalmente experimentará mayor deterioro. Por eso la tasa de degradación del envejecimiento está referida a la- temperatura del punto caliente del arrollamiento y puede ser estimada a partir de la siguiente expresión (Fraile Mora, 2008):

$$D_y(T) = 2^{\frac{T-90}{8}} \quad (2.1)$$

donde T es la temperatura del punto caliente y  $D_y(T)$  es la velocidad relativa de envejecimiento a un funcionamiento a 90° C. Esta expresión es válida para unas condiciones de humedad, oxígeno y ácidos constantes.[4]

### 2.1.3. Degradación del aceite.

Los transformadores grandes de potencias están llenos de aceite que refrigera y aísla los devanados del transformador. El aceite mineral es el tipo más común para los transformadores que se encuentran al aire libre, aunque también se utilizan fluidos resistentes al fuego como el polychlorinated biphenyls (PCB) y la silicona. Los PCBs se encuentran dentro de un grupo más grande de contaminantes orgánicos persistentes y dañinos (POPs) que suponen un riesgo, al causar efectos adversos en la salud humana y en el medio ambiente (Fraile-Mora, 2008).

Durante el funcionamiento de un transformador, varios son los factores que contribuyen al deterioro del aceite aislante, y que se pueden calificar como intrínsecos o extrínsecos según la posibilidad que tienen de afectar a la propia estructura química del aceite, haciéndola evolucionar hacia otros compuestos.

Factores intrínsecos:

- Temperatura.
- Campo eléctrico: descargas parciales y arcos.
- Oxidación.

Factores extrínsecos:

- Humedad.
- Partículas sólidas en suspensión.

Tal y como se ha visto, la humedad afecta significativamente a las propiedades dieléctricas no solo del aceite, sino también del papel aislante. A su vez, la descomposición del papel aislante tiene como consecuencias, aparte de la mencionada pérdida de propiedades dieléctricas, la pérdida de sus propiedades mecánicas. También la generación de más agua que se incorpora a la ya existente en el transformador, acelerando el mecanismo de daño.

Las partículas sólidas en suspensión (procedentes de electrodos, gases de descomposición...) se tratarán como factor potenciador de otro mecanismo de daño diferenciado como son las Descargas Parciales (DP) [4].

#### 2.1.3.a. Descomposición termo-eléctrica

La absorción de energía por parte del aceite puede diferenciarse en tres niveles de intensidad (ordenados en orden creciente):

- Efecto de descargas parciales.
- Pirolisis por calentamiento térmico.
- Arcos Eléctricos.

Esas tres categorías difieren principalmente en la intensidad de energía que liberan por unidad de tiempo y por unidad del volumen. Este cambio de energía se produce en forma de reacción química, alterando la composición química y generando otros compuestos que se incorporan en el aceite. [4]

### **2.1.3.b. Descomposición por oxidación**

Cuando el aceite entra en contacto con el oxígeno, reacciona con él ayudado con la acción de catalizadores metálicos tales como el cobre y el hierro. Podemos diferenciar los productos así originados de la siguiente manera:

Ácidos: Son compuestos polares solubles (a diferencia del aceite aislante que está formulado a base de compuestos no polares), que contribuyen a aumentar las pérdidas dieléctricas del transformador. La presencia de estos productos a su vez potencia la merma de propiedades dieléctricas (aumento de la tangente de delta, ver sección 2.2.4.a.1), lo que produce un aumento de la temperatura a tensión y corriente nominal; a su vez, este aumento de la temperatura acelera el proceso de oxidación.

Adicionalmente, los ácidos atacan a su vez a los metales y a la celulosa del papel, acelerando aún más el proceso de envejecimiento del transformador.

Lodos: Son sedimentos óxidos que enturbian el aceite y dificultan la función refrigerante del mismo, ya que se depositan sobre los devanados disminuyendo la capacidad de intercambiar calor entre el aceite y los devanados. La principal consecuencia de este efecto es el aumento de temperatura, con su efecto nocivo asociado a múltiples mecanismos de daño, incluido el propio de la oxidación [4].

### **2.1.4. Esfuerzos electrodinámicos**

La coexistencia de los elevados valores que pueden alcanzar las corrientes de cortocircuito, junto con el campo magnético de dispersión, genera esfuerzos electrodinámicos y térmicos de considerable magnitud en las barras, aisladores, interruptores y demás elementos de los circuitos recorridos por estas corrientes. La reducción de la tensión de cortocircuito de un transformador incrementa la importancia de estos fenómenos. Los calentamientos producidos por las corrientes de cortocircuito pueden provocar la fusión o debilitar la resistencia mecánica a altas temperaturas, justamente cuando aparecen los mayores esfuerzos electrodinámicos.

Independientemente de la aparición de estos fenómenos anómalos, sobrecargas de corriente o variaciones de la misma (fenómenos más comunes), también dan lugar a fuerzas mecánicas como consecuencia de la interacción con flujos magnéticos parásitos del transformador (según la ley de Biot y Savart,  $\mathbf{F} = I \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{B})$ ) [5].

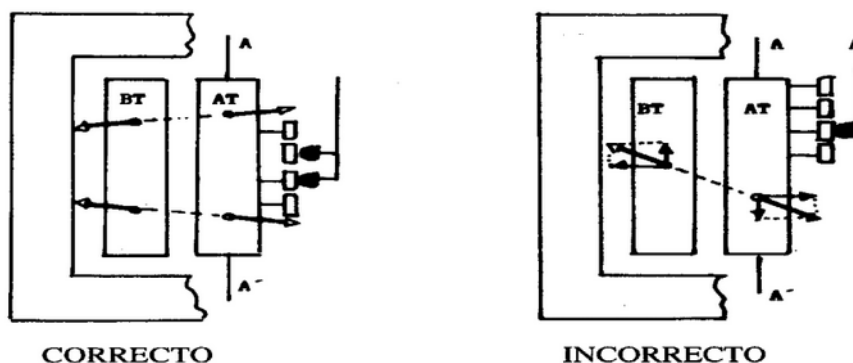


Figura 2. 3. Ejemplos de fuerzas de tracción mecánica en devanados. Efecto de la posición del cambiador de tomas de carga. [4]

Cuando se presentan fuertes corrientes (por ejemplo, cortocircuitos), los esfuerzos electrodinámicos desencadenados adquieren verdadera importancia, y si la construcción no es muy robusta, son capaces de superar la resistencia mecánica de los materiales, provocando una ruptura de barras, aisladores, o el colapso del transformador. Para esto se determina el tipo de fallo que producen los más altos esfuerzos, y en base a éstos, se calculan las fuerzas que soportarán los equipos para así poderlos dimensionar correctamente. En cualquier caso, una sobrecarga ligera puede producir una compresión repetitiva de los aislamientos celulósicos, lo que puede degradarlos. Es más, si éstos están ya degradados previamente por otros mecanismos (explicados en las secciones del punto 2.1.), será mucho más fácil que estos cortocircuitos entre espiras (o incluso espira-tierra) se produzcan [5].

## 2.2. Técnicas de medida para estimar el estado del transformador

### 2.2.1. Medida de la humedad

Tal y como se ha indicado anteriormente, el contenido de agua en los materiales de aislamiento aumenta la conductividad eléctrica y el factor de disipación (ver sección 2.2.4.a.1) y reduce la rigidez dieléctrica. Por ello, la medida de humedad en papel y aceite es muy importante.

Ha sido una práctica muy común medir el contenido de humedad en el aceite mediante el método de valoración de Karl-Fischer (1997) y a partir de él, estimar el contenido de humedad en el aislamiento sólido con diferentes curvas de equilibrio.

Se probó un sensor de humedad capacitivo de película delgada para la detección de humedad en el aceite del transformador que resultó funcionar bien en condiciones climáticas tanto cálidas como frías. Neimanis et al. investigaron la espectroscopia de infrarrojos cercanos (NIR) para la determinación del contenido de humedad del aceite que impregna el papel [6]. Gupta confirmó la efectividad de la espectroscopia NIR para detectar cambios muy pequeños en el

contenido de humedad del papel aislante [5]. Un gran número de técnicas de polarización basadas en diagnóstico dieléctrico (Polarization-Depolarization Currents (PDC), tangente de delta en bajas frecuencias..., que se explican posteriormente) también se usan actualmente para el análisis indirecto de la humedad del sistema de aislamiento aceite-papel [6].

Esta técnica no se puede aplicar en transformadores en funcionamiento ("on-line") y, además, no puede detectar mecanismos de degradación como los de carácter mecánico.

### 2.2.2. Grado de polimerización

El aislamiento sólido (papel, cartón prensado...) usado en transformadores es una lámina de material hecha de celulosa vegetal. La principal fuente de fibra de celulosa es la madera que, en condiciones secas, contiene entre un 40% y un 50% de celulosa, del 20 al 30% de lignina y entre el 10 y el 30% de hemicelulosa y polisacáridos. Las buenas propiedades mecánicas de la celulosa y sus derivados se deben a su naturaleza fibrosa y polimérica. El número de unidades monoméricas en un polímero se conoce como su grado de polimerización (DP). Muy a menudo, la calidad de la celulosa se mide en términos de su grado de polimerización a través del método de la media viscométrica. La longitud de la cadena de celulosa así medida, se denotará como  $DP_v$ .

La medida  $DP_v$  ha sido utilizada como una herramienta de diagnóstico para determinar las condiciones de los transformadores por muchos investigadores (Oomen (1981), Shroff (1985), Moser (1986), etc.)

El papel Kraft (es un tipo de papel basto y grueso de color marrón fabricado con pasta química, sin blanquear y sometido a una cocción breve, muy resistente al desgarro, tracción, estallido) tiene una longitud media de cadena entre 1000 y 1500. Después de un largo período de servicio a altas temperaturas y con grandes concentraciones de agua y oxígeno, el papel se vuelve quebradizo, cambia a un color marrón oscuro y su  $DP_v$  cae a entre 200 y 250. Para el papel Kraft con un  $DP_v$  de entre 150 y 200, la resistencia mecánica se habrá reducido al 20% de la inicial y en este punto se puede considerar que ha llegado al final de su vida útil. Existen artículos de investigación basados en el envejecimiento acelerado del aislamiento aceite/papel, en los que se considera que el criterio para fijar el final de vida útil del papel es el 50% de su resistencia mecánica o 200-250 como el valor de grado de polimerización.

Pahlavanpour et al. hicieron investigaciones experimentales sobre el envejecimiento debido a la temperatura del papel Kraft y sugirieron que el  $DP_v$  del papel empieza a decrecer a partir de los 120°C. Este decrecimiento es mayor cuando aumenta la temperatura, alcanzando el final de la vida útil en los 180°C. McNutt describe la importancia del criterio de la vida útil en su artículo escrito en 1992. También señaló que muchos transformadores en servicio han continuado operando con un nivel de  $DP_v$  en su aislamiento por debajo de 100, cuando él sugiere que el punto en el que debe dejar de operar debería ser 200. Por tanto, parece que la interpretación de los datos en esta técnica no es fácil. Emsely et al. (1992) dieron la ecuación para predecir la vida útil que le queda a un transformador, la (2.2):

$$vida = \frac{0,004}{A} e^{\frac{13600}{T+273}} \text{ horas} \quad (2.2)$$

donde T=temperatura en grados Celsius, E=energía de activación y A un valor dependiente de las condiciones de operación.

También resaltaron las ventajas y desventajas de la predicción de la vida a partir de las medidas de  $DP_v$ . Las medidas de  $DP_v$  son fáciles de llevar a cabo y pueden ser relacionadas fácilmente de manera empírica con las condiciones del aislamiento. Por otra parte, los mecanismos y cinética del proceso no están muy definidos. La tasa de degradación depende del tipo de papel y también del tratamiento químico.

Los estudios del peso molecular ("Molecular weight", MW) mediante la cromatografía de permeación en gel (GPC) se ha demostrado que son más útiles cuando se hacen con papel Kraft, particularmente en casos donde la distribución del peso molecular cambia significativamente con los procesos de degradación. La GPC proporciona el mejor modo de obtener una distribución del peso molecular detallada para el polímero. Como la GPC da la distribución completa, cualquier pequeño cambio en el peso molecular durante el proceso de envejecimiento del material de aislamiento es fácilmente observable a través del cromatograma. Las medidas del GPC dan información sobre los cambios en el peso molecular y sobre la distribución del peso molecular. En la figura 2.4 se muestra un cromatograma típico GPC con distribuciones de peso molecular para un papel nuevo y para otro de un transformador de 25 años. En esta figura se ve que cuanto mayor sea el volumen de la elución (extracción de aceite del medio sólido que la ha absorbido), menor será el peso molecular [6]

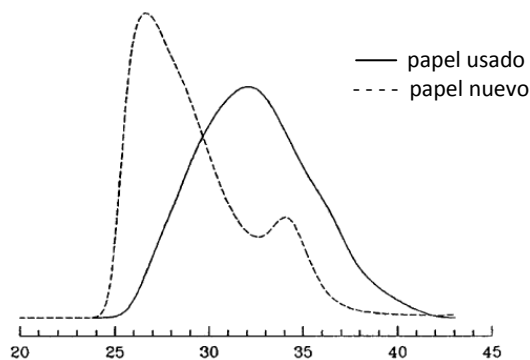


Figura 2. 4. Elución volumen/mL. El peso molecular aumenta hacia la izquierda. [6]

Ali et al. (1996) también señalaron que la  $DP_v$  da solo una estimación aproximada de la media de la longitud de las cadenas de celulosa y su variación durante el envejecimiento es una medida poco exacta [6].



Aunque esta técnica podría detectar degradación mecánica, no solo requiere desconectar el transformador, sino también abrirlo para extraer muestras de papel. Por este motivo la aplicación de esta técnica está muy limitada en la industria.[6]

### 2.2.3. Análisis de aceite

El análisis del aceite permite detectar muchos mecanismos de degradación, pero no deformaciones mecánicas. En algún caso, se permiten medidas con el transformador en servicio.

#### 2.2.3.a. DGA (*Dissolved Gas Analysis*)

DGA (Dissolved Gas Analysis) es el estudio de gases disueltos en un transformador. Los materiales de aislamiento dentro de los transformadores y los equipos eléctricos, se descomponen y liberan gases dentro de la unidad. Son producidos por oxidación, vaporización, descomposición del aislamiento, descomposición del aceite y acción electrolítica [7]. La distribución de estos gases está relacionada con el tipo de degradación y su proporción puede indicar la gravedad del fallo. La naturaleza de los gases generados en una unidad concreta será una información muy útil en un programa de mantenimiento preventivo [Joseph B. DiGiorgio, 2011]. El DGA normalmente consiste en extraer una muestra del aceite y mandarlo al laboratorio para su análisis. Las unidades móviles de DGA pueden ser también transportadas al sitio que interese, y algunas de ellas pueden ser conectadas directamente al transformador cuando éste está en operación [7].

##### 2.2.3.a.1. Análisis

Se puede obtener suficiente información a partir de nueve gases. Los nueve gases que se analizan son:

- Gases atmosféricos: hidrógeno ( $H_2$ ), nitrógeno ( $N_2$ ), y oxígeno ( $O_2$ ).
- Óxidos de carbono: Monóxido de carbono ( $CO$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ).
- Hidrocarburos: Acetileno ( $C_2H_2$ ), etileno ( $C_2H_4$ ), metano ( $CH_4$ ) y etano ( $C_2H_6$ ).

Los gases extraídos de la muestra de aceite se inyectan en un cromatógrafo donde las columnas los separan. Estas columnas retrasan selectivamente los gases de la muestra, que son identificados a medida que pasan secuencialmente por cada detector. Se llama cromatograma a la representación en una gráfica de la señal del detector con respecto al tiempo [7].

##### 2.2.3.a.2. Tipos de fallo

Los fallos térmicos son detectados mediante la presencia de subproductos de la descomposición del aislamiento sólido. Por ejemplo, cuando ocurre un fallo eléctrico, se libera energía que rompe los enlaces químicos del fluido de aislamiento. Una vez que los enlaces se han roto, los elementos rápidamente se reagrupan para formar los gases de fallo. Las energías y proporciones con las que los gases se forman son diferentes para cada uno de ellos, lo que permite que los datos sean examinados para determinar el tipo de actividad de degradación que se está llevando a cabo dentro del equipo eléctrico [8]:

- Sobrecalentamiento del aislamiento: deteriora el aislamiento de celulosa. En este caso, los resultados del DGA muestran altos niveles de monóxido de carbono y de dióxido de carbono. En casos extremos, el metano y el etileno se encuentran en sus niveles más altos.
- Sobrecalentamiento del aceite: descomposición del líquido por el calor que forma metano, etano y etileno.
- Efecto corona: es una descarga parcial que se detecta en el DGA por niveles elevados de hidrógeno.
- Arco eléctrico: es el más severo de los fallos y se muestra a través de niveles muy bajos de acetileno.

En 2002, Michael Duval propuso una forma gráfica de representar los resultados del DGA de una forma más amigable para el usuario, que se muestra a continuación:

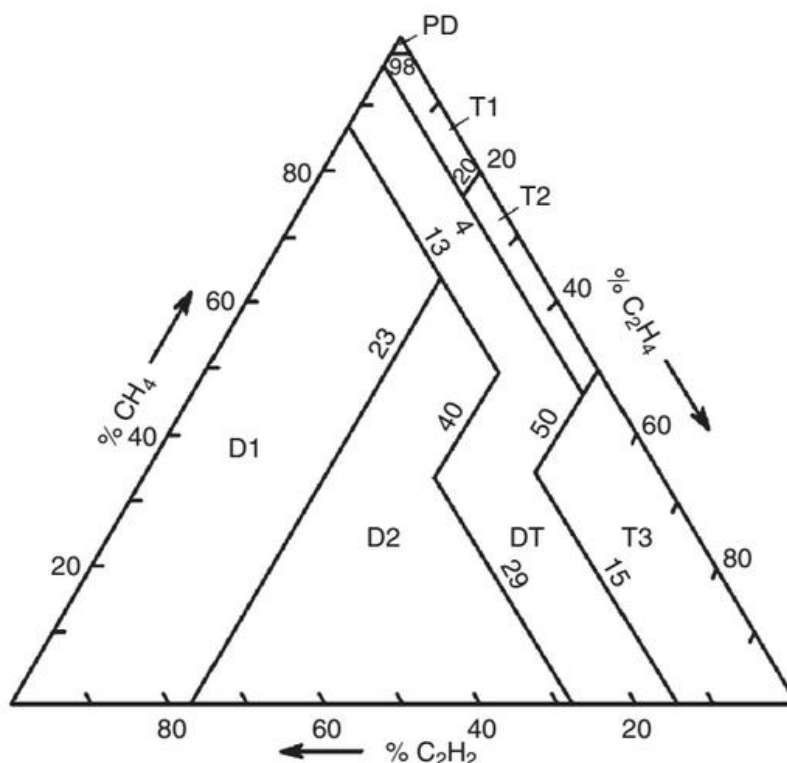


Figura 2. 5. Triángulo ideado por Michael Duval. [9]

El triángulo ilustra los diferentes tipos de fallo en función del porcentaje de los gases de fallo principales, donde [9]:

PD: Descargas parciales  
D1: Descargas de baja energía.  
D2: Descargas de alta energía.  
T1: Fallos de temperatura <300°C  
T2: Fallos de temperatura 300°C<T<700°C  
T3: Fallos de temperatura >300°C  
DT: Mezcla de fallos térmicos y eléctricos.

### **2.2.3.b Análisis de furanos.**

Los furanos son fruto de la degradación del papel que se encuentran en el aceite, como se ha explicado en el punto 2.1.2. La técnica de las pruebas de furanos se describe en el IEC (IEC 61198 1993-09, 1993), pero no existe una guía para su interpretación. Blue et al. desarrollaron un nuevo material en estado sólido específicamente para detecciones de furanos y que ha sido útil en la detección de concentraciones pequeñas de menos de 1 ppm dentro del aceite del transformador. Después R. Blue et al. (1998) construyeron un nuevo sensor eléctrico para determinar las concentraciones de furanos tan bajas como 0.1 ppm.

Varios autores exploraron la posibilidad de relacionar la concentración de furanos con el grado de polimerización ( $DP_v$ ). Entre ellos se encuentran Chedong et al. (1991), De Pablo (2003) y Pahlavanpour et al. (1995). Todos ellos apuestan por relaciones del tipo:

$$\log(A + F) = B - C \cdot \log(DP_v) \quad (2.3)$$

Donde F es la concentración de furfuraldehído en mg/L y A, B y C son constantes, cuyos valores dependen de factores como la temperatura, el tipo de aislamiento, etc. [6].

### **2.2.4. Análisis de respuesta dieléctrica**

Recientemente, la atención se ha centrado más en la medición de los parámetros de respuesta dieléctrica que caracterizan algunos fenómenos conocidos de polarización. Las tres técnicas principales son [10]:

- Medidas de tensión de retorno (“Recovery o Return Voltage Measurements”, RVM)
- Espectroscopia dieléctrica en el dominio del tiempo, es decir, mediciones de la corriente de polarización y despolarización (“Polarization-depolarization currents”, PDC)
- Espectroscopia dieléctrica en el dominio de la frecuencia (FDS), es decir, mediciones de la capacidad C y del factor de pérdidas ( $\tan\delta$ ) dependientes de la frecuencia.

Hasta hace poco, la técnica RVM ha sido el método más usado con diferencia. Sin embargo, se ha creado controversia (A.J. Kachler et al. (1996), A.J. Kachler (1999)) alrededor de esta técnica, que ha sido criticada por los siguientes motivos [10]:

- Los resultados de humedad suelen ser mucho más altos que los hallados por otros métodos (Tettex Instruments AG, 1992).
- El sistema recomendado de interpretación es demasiado simplista.
- Esta técnica no tiene en cuenta la dependencia de la geometría del transformador y las propiedades del aceite.

#### *2.2.4.a. Comportamiento dieléctrico del sistema impregnado en aceite*

Asumiendo que el material dieléctrico es lineal, homogéneo e isotrópico, la información obtenida tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia puede ser la misma y los resultados pueden ser transformados de un dominio a otro.

En el dominio del tiempo, la conductividad  $\sigma_{dc}$ , la componente instantánea (en alta frecuencia) de la permitividad relativa  $\epsilon_{\infty}$ , y la función de respuesta dieléctrica,  $f(t)$ , caracterizan el comportamiento de un material dieléctrico. La función de respuesta  $f(t)$ , es la respuesta a un pulso tipo delta de Dirac de entrada. De aquí, la respuesta, o polarización,  $P$ , puede ser calculada para cualquier forma de excitación  $E(t)$  mediante la convolución:

$$P = \int_0^{\infty} f(t)E(t - \tau)d\tau. \quad (2.4)$$

También conviene señalar que las medidas de corrientes en el dominio del tiempo pueden llevar directamente a la cuantificación, o por lo menos, estimación de  $\sigma_{dc}$  y de  $f(t)$ .

La transformada de Fourier de la función de respuesta  $f(t)$  permite la transformación al dominio de la frecuencia y conduce a la susceptibilidad compleja:

$$\hat{\chi}(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega) \quad (2.5)$$

que permite obtener la permitividad de la siguiente forma:

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_{\infty} + \chi'(\omega), \epsilon''(\omega) = \frac{\epsilon_{dc}}{\epsilon_0\omega} \quad (2.6)$$

Otro parámetro de gran importancia es el factor de pérdidas o tangente de delta:

$$tg(\delta) = \epsilon''(\omega)/\epsilon'(\omega) \quad (2.7)$$

Éste caracteriza el calentamiento por unidad de volumen que se puede dar en un aislamiento por el hecho de conducir cierta corriente eléctrica al estar sometido a alta tensión. Cuanto más degradado esté un aislamiento, mayor es este factor, lo que puede deberse al aumento de la componente conductiva del dieléctrico  $\sigma_{dc}$  (aumento de portadores de carga por contaminación o degradación de la muestra) o bien de la componente de polarización en  $\chi''$  (aumento de concentración de especies polares, como el agua) [10].

### 2.2.4.a.1. Capacidad y factor de disipación

La medida es una técnica “off-line” para medir la capacidad y factor de disipación del aislamiento de transformadores. Se hace con tensión alterna. No es un ensayo potencialmente destructivo.

Proporciona información sobre umbrales admisibles. Resulta valiosa la información sobre la tendencia de las medidas en mantenimiento programado anual [11].

#### 2.2.4.a1.1. Principio físico propuesto

Un aislamiento ideal consume una corriente que está desfasada 90° respecto a la tensión aplicada. Cuando un aislamiento tiene impurezas, permite el paso de corriente eléctrica por su superficie y volumen; igualmente, la oscilación de dipolos ante la aplicación de CA produce una fricción entre ellos, que da lugar a un calentamiento del material. El desfase entre la corriente derivada y la ideal (capacitiva), se conoce como ángulo de pérdidas ( $\delta$ ), y su tangente es el factor de disipación ( $\text{tg}(\delta)$  ó FD), cuyo valor da una estimación del estado del aislamiento. Por tanto, un aislamiento real se modela como un condensador (C) en paralelo con una resistencia (R) que modela el consumo de potencia activa del material [11].

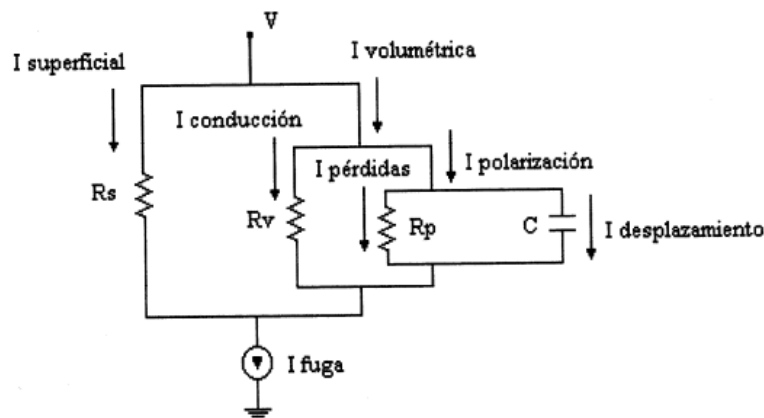


Figura 2. 6. Modelo eléctrico de un aislante real. [11]

La potencia eléctrica disipada será  $P_{ac}=U \cdot I_R$ . Por otro lado:

$$I_R=I_C \cdot \text{tg } \delta=U \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg } \delta \quad (2.8)$$

Siendo  $I_R$  e  $I_C$ :

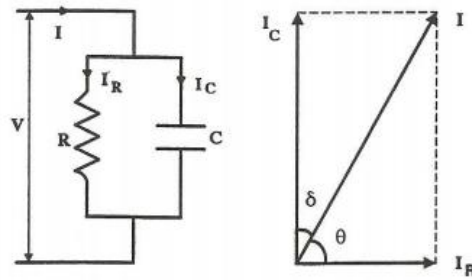


Figura 2. 7. Modelo eléctrico de aislamiento y definición de tangente de  $\delta$ . [11].

Considerando la  $P_{ac}$  y la capacidad como  $\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$ , finalmente la ecuación para las pérdidas por unidad de volumen es:

$$P_{ac} = \frac{U^2 \omega t g \delta}{A d} = \frac{E^2 f \epsilon_r t g \delta}{\frac{1}{2 \pi \epsilon_0}} \left( \frac{W}{cm^3} \right) \quad (2.9)$$

Un calentamiento excesivo del material aislante o la ruptura de enlaces del polímero enriquece la oxidación del mismo, lo que provoca un aumento de las moléculas polares capaces de rotar y del calentamiento del material. Igualmente, la impregnación con agua aumenta el FD del aislamiento [11].

Por otro lado, el propio dato de C, incluye información sobre la degradación del aislante [11]:

- La absorción de agua en el dieléctrico producirá un aumento de la capacidad equivalente del mismo, debido a la alta permitividad de esta sustancia (cerca de 80).
- Una deformación de los devanados (debido a esfuerzos electromecánicos) puede provocar cambios en la capacidad entre bobinas o entre bobinas y tierra.

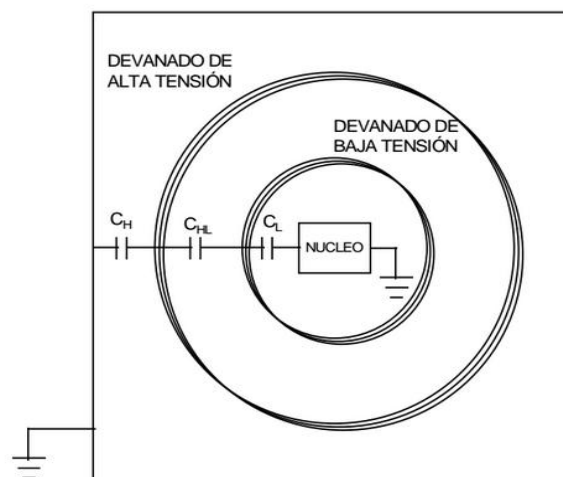


Figura 2. 8. Capacidades del aislamiento de un transformador. [11].

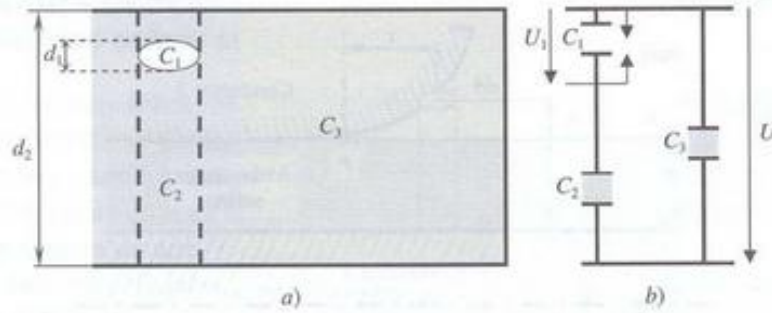


Figura 2. 9. Modelo eléctrico de aislante con vacuola. [11]

Los valores marcados para la aceptación o rechazo según la norma IEEE C57 1290 para transformadores de papel-aceite son los nombrados en la siguiente tabla:

Tabla 2. 1. Aceptación/Rechazo según factor de potencia. [11].

FP (20°)	Posible estado aislamiento
<0,5%	Bueno
0,5%<FP<1%	Investigar
>1%	Malo

#### 2.2.4.b. Métodos de medida

Por lo tanto, en el dominio de la frecuencia, la conductividad  $\sigma_{dc}$ , la componente de alta frecuencia de la permitividad relativa  $\epsilon_{\infty}$ , y la susceptibilidad compleja dieléctrica  $\hat{\chi}(\omega)$ , caracterizan al material dieléctrico y, como en el dominio del tiempo, es posible encontrar estos parámetros a través de medidas.

El sistema de aislamiento aceite-papel es un compuesto de dos medios dieléctricos diferentes, donde un líquido aislante con conducción iónica está mezclado con un sólido impregnado de baja conductividad (cartón prensado o papel). Es importante señalar que cada uno de ellos tiene su propia respuesta dieléctrica y que fruto del proceso de impregnación, la respuesta total no solo reflejará las propiedades de cada material sino también la forma en la que se combinan. Cuando estos dos medios se ponen en contacto, se da una acumulación de carga eléctrica en las superficies de las interfaces debido a las diferencias entre sus propiedades eléctricas. Este tipo de polarización se llama Maxwell-Wagner.

La respuesta dieléctrica del aceite mineral es bastante simple y se caracteriza por una permitividad independiente de la frecuencia  $\hat{\epsilon}(\omega) = cte = 2.2$ , y la conductividad  $\sigma_{dc}$ , mientras que la función respuesta dieléctrica  $f(t)$  puede ser despreciada. Por otro lado, el cartón prensado se caracteriza por una notable variabilidad temporal de su respuesta dieléctrica, y  $f(t)$  no puede ser despreciada. Esta respuesta es fuertemente dependiente del contenido de

humedad y los agentes envejecedores. Si ambos componentes, es decir, aceite y papel, están intercalados, es posible estimar el comportamiento resultante [12].

- En el dominio del tiempo:

La medida de las corrientes de polarización y despolarización (PDC) tras un impulso tipo escalón de corriente continua es una manera de caracterizar en el dominio del tiempo los procesos de polarización lenta. Tanto la corriente de polarización,  $i_p(t)$ , como la de despolarización,  $i_d(t)$ , contienen información sobre la función de respuesta dieléctrica  $f(t)$ . Muchos materiales sólidos dieléctricos tienen funciones de respuesta dieléctrica que decrecen lentamente con el tiempo. También es posible estimar la conductividad  $\sigma_{dc}$  del objeto de estudio a través de las medidas de las corrientes de polarización y despolarización [12]

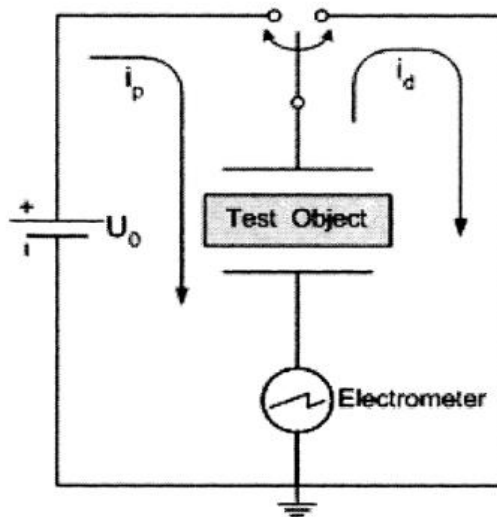


Figura 2. 10. (a). Circuito básico para la medida de las corrientes de polarización y despolarización. [12]

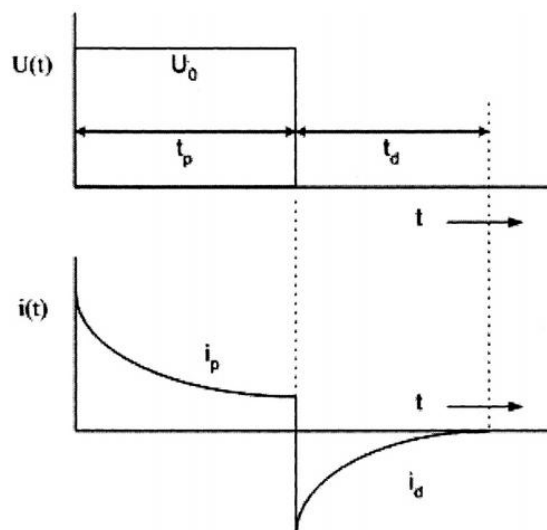
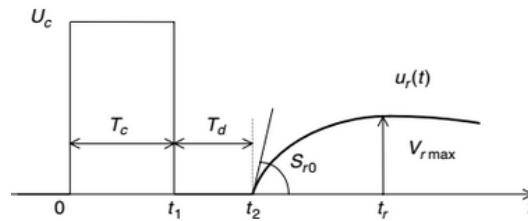


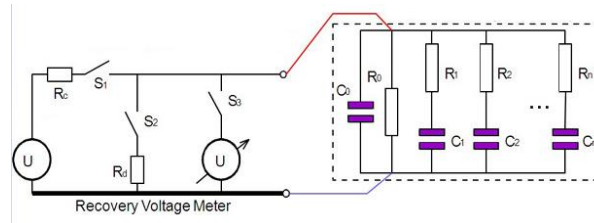
Figura 2. 10. (b). Forma de onda de las corrientes de polarización  $i_p$  y despolarización  $i_d$ . [12]



El método de la tensión de retorno (RVM) es otro método en el dominio del tiempo utilizado para investigar los procesos de polarización lenta. Primero se aplica una tensión continua de forma escalón que carga el objeto. Durante este periodo, la corriente de polarización fluye por él. Después, el objeto probado se cortocircuita (es puesto a tierra) durante un tiempo (normalmente más corto que el tiempo que ha estado cargando) y fluye la corriente de despolarización. Cuando el período de cortocircuito (puesta a tierra) termina, la tensión de retorno  $u_r(t)$  se mide en condiciones de circuito abierto (Figura 2.11 a)). La forma de conexión para este método se muestra en la Figura 2.11 (b). La fuente de la tensión de retorno es el remanente de la polarización que queda en el sistema de aislamiento (la descarga del condensador equivalente es incompleta), dando lugar a una carga inducida en los electrodos. Es complicado calcular  $\sigma_{dc}$ ,  $\epsilon_\infty$  y  $f(t)$  de una tensión de retorno dada dependiente del tiempo. Por eso se ha introducido un llamado espectro de polarización, establecido mediante la realización de una serie de mediciones de la tensión de retorno con un aumento gradual del tiempo de carga  $T_c$ , y del tiempo de cortocircuito  $T_g$ , normalmente con la relación  $T_c/T_g = 2$ . Para cada medición, el pico de la tensión de retorno  $U_{Rmax}$  y su pendiente máxima  $dU_R/dt$  se graban y representan frente al tiempo de carga usado [12].



**Figura 2. 11. (a) Principio del método de medida de la tensión de retorno.**  $T_c$ =Tiempo de carga,  $T_d$ =Tiempo de descarga,  $t_R$ =Tiempo de pico. [13]



**Figura 2. 11. (b) Método de conexión para el método de RVM.** [14]

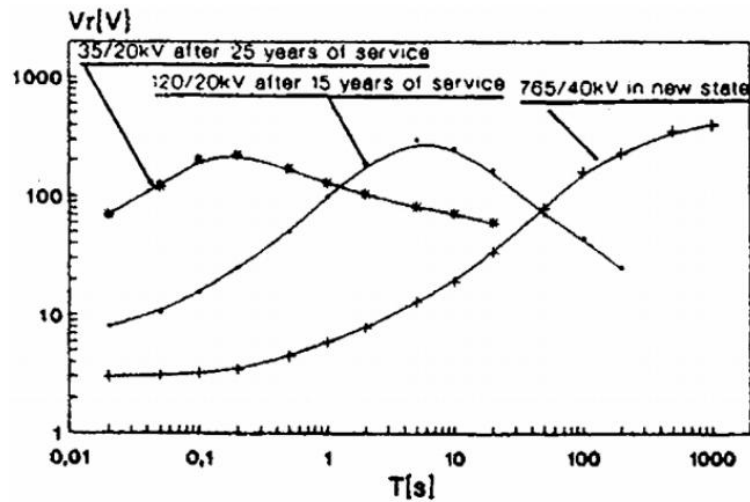


Figura 2. 12. Tensión de retorno para transformadores de diferentes edades. Se observa que  $V_r$  max decrece con el envejecimiento y su pendiente se hace menor. La primera curva es de un transformador de 25 años, la 2ª de uno de 15 años y la 3ª de uno nuevo. [6]

- En el dominio de la frecuencia:

Un método equivalente en el dominio de la frecuencia para investigar la polarización es medir la respuesta de las excitaciones sinusoidales en diferentes frecuencias (FDS). De esta manera, se puede encontrar la dependencia en frecuencia de la permitividad relativa compleja  $\epsilon(\omega)$ . Es importante recordar que la parte compleja de la permitividad relativa  $\epsilon''(\omega)$ , siguiendo la ecuación (2.6), contiene tanto las pérdidas resistivas (conducción en corriente continua) como las dieléctricas (polarización) y que a una frecuencia dada es imposible distinguir entre las dos. Otra forma de presentar la información calculada de un FDS es usar el factor de pérdidas  $\tan \delta$ , que se ha explicado en el punto anterior de este capítulo. La medida de este parámetro en bajas frecuencias (menos de 1Hz) permite detectar incrementos de concentración de humedad relativa [12].

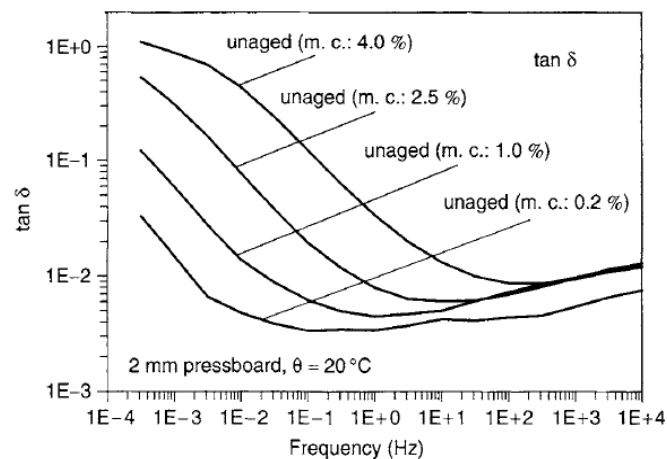


Figura 2. 13. Media de FD en VLF para diferentes muestras con diferentes grados de humedad. [13]

La caracterización del sistema de aislamiento con estas medidas de respuesta en frecuencia, también está integrada dentro de las medidas de respuesta en frecuencia que son el objeto de este trabajo (ver capítulo 3).

### **2.2.5. Medidas de la temperatura**

Como es sabido, el envejecimiento del aceite en el que se encuentra inmersa la celulosa del aislamiento de un transformador depende, fundamentalmente, de su temperatura. Para tener especial cuidado con este comportamiento, se han creado sistemas de monitorización para controlar el estrés térmico del aislamiento en los transformadores que usan aceite. Este sistema mide la carga del transformador, las temperaturas típicas del aceite del transformador y de sus unidades de refrigeración, la posición de los cambiadores de tomas y el estado de los ventiladores y de las bombas de todas las unidades de refrigeración. También se evalúa la señal de salida de un sensor de gas en aceite. El propósito del conjunto es desarrollar estrategias y algoritmos para proteger a los transformadores del envejecimiento prematuro a través de alarmas cuando se den condiciones de operación crítica.

Con el propósito de determinar la distribución de temperaturas en los devanados con una precisión mejorada, se han diseñado modelos de térmicos y se han integrado en sistemas de monitorización. Esto permite la determinación de la temperatura de los puntos más calientes ("hot-spots") de los devanados de un transformador con refrigeración de aceite forzada y natural. La temperatura de los hot-spots depende de las temperaturas del aceite medidas y de la carga actual del transformador. [15].

Evidentemente, esta técnica no puede detectar muchos mecanismos de degradación eléctricos ni mecánicos.

### **2.2.6. Resistencia de aislamiento**

Es una técnica "off-line" para medir la resistencia de aislamiento de transformadores (también usada en cables y devanados estáticos y rotóricos). Se hace con tensión continua. No es potencialmente destructiva para el equipo a ensayar y trata de confirmar que los valores medidos no están por debajo de umbrales admisibles. También resulta valiosa la información sobre la tendencia de las medidas en mantenimiento programado [11].

#### **2.2.6.a. Principio físico propuesto**

Se aplica alta tensión continua al sistema de aislamiento, midiendo la corriente total derivada por el aislamiento a tierra mediante un amperímetro de gran sensibilidad. El cociente de ambas magnitudes determina la variable a estudiar ( $R_a$ ), pero deben sistematizarse los

tiempos de medida, pues un aislamiento sometido a una tensión continua consume una corriente variable con el tiempo. Esta corriente tiene varias componentes que deben ser conocidas [11]:

- Corriente capacitiva: Es una corriente muy alta, que decrece exponencialmente con el tiempo. Es la corriente de carga de la capacidad equivalente del aislante, cuyo valor, junto con la resistencia de salida de la fuente de potencia, determina la rapidez de la disminución de la corriente (típicamente, es despreciable tras 10s). No contiene información valiosa para el diagnóstico.
- Corriente de conducción: Se debe al flujo de portadores libres que haya en el volumen del aislamiento; éstos son más numerosos en caso de penetración de humedad. También es importante si el aislamiento a tierra está contaminado o presenta roturas, cortes o vacuolas. Su valor es constante con el tiempo e idealmente debería ser nulo.
- Corriente parásita superficial: Circula por contaminación superficial del aislamiento. Ésta puede deberse a aceite o humedad mezclada con polvo, suciedad, cenizas, subproductos químicos etc. Por tanto, si la corriente es grande implica que la contaminación ha producido deterioro que se refleja en contorneo del aislamiento ("electrical tracking").
- Corriente de absorción: Se debe a la orientación de moléculas polares de materiales orgánicos ante la aplicación del campo eléctrico, por lo que una vez alineadas, debería ser nula (esto debería ocurrir a los 10min, porque encuentran oposición del campo de otros dipolos más lentos). Al igual que la componente capacitiva no aporta indicación sobre el estado del aislamiento. Como se puede apreciar en la Figura 2.14, esta componente tiene una magnitud importante entre 30 segundos y algunos minutos de aplicación de la tensión DC.

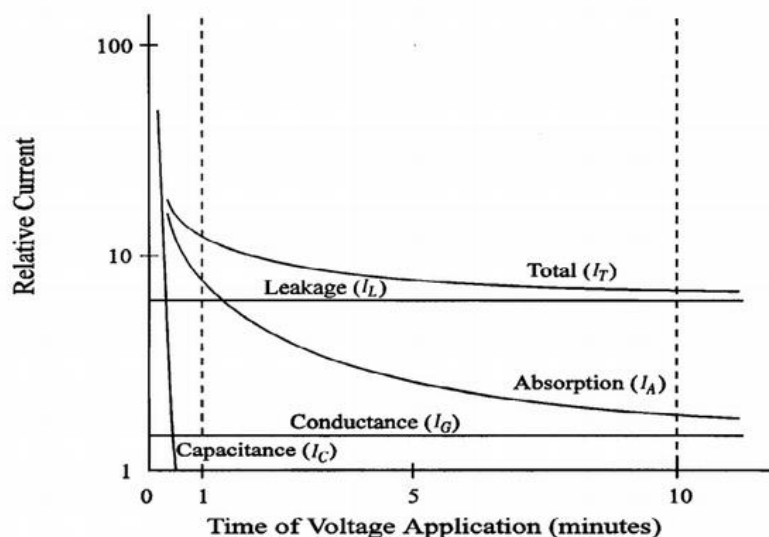


Figura 2. 14. Tipos de corrientes para un aislamiento asfáltico-mica. [16]

Si los aislamientos están contaminados y/o húmedos, las corrientes de conducción y superficial serán predominantes, por lo que la reducción de corriente con el tiempo será muy pequeña y la medición se hará estable tras 1-2min.

Para evitar la componente capacitiva, la medida de resistencia de aislamiento se debe hacer tras 1min de tensión aplicada. Sólo algunos valores altos de  $R_{a1}$  dan resultados válidos, y en todo caso, no pueden ser utilizados como tendencia para analizar el grado de envejecimiento del aislante, porque dependen fuertemente de la humedad y de la temperatura ambiental. La primera es difícil de controlar, pero la temperatura sí que debe ser corregida; para ello se recurre a aproximaciones que permiten normalizar  $R_{a1}$  (T) para valores estándar de 20°C utilizando tablas (Gill, 1998):

**Tabla 2. 2. Factor de corrección de temperatura para  $R_{a1}(T)$ . [11].**

<b>Factores de corrección de temperatura para transformadores (20°C)</b>		
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Con cuba de aceite</b>	<b>Aislamiento seco</b>
0	0,25	0,40
5	0,36	0,45
10	0,50	0,50
15,6	0,74	0,75
20	1,00	1,00
25	1,40	1,30
30	1,98	1,60
35	2,80	2,05
40	3,95	2,50
45	5,60	3,25
50	7,85	4,00
55	11,20	5,20
60	15,85	5,40
65	22,40	8,70
70	31,75	10,00
75	44,70	13,00

Se considera como valor mínimo aceptable para  $R_{a1}$  a 20 °C (MΩ) la tensión nominal del devanado en kV+1. Seguidamente se muestran los valores típicos de sistemas de aislamiento correctos en diferentes transformadores (Gill, 1998) [11]:

**Tabla 2. 3. Valores de  $R_{a1}$  (MΩ) aceptables para aislamientos sanos en transformadores. [11]**

<b>Tensión nominal (kV)</b>	<b>20°</b>	<b>30°</b>	<b>40°</b>
<6,6	400	200	100
6,6-19	800	400	200
19-45	1000	500	250
>45	1200	600	300

Además de ser una técnica off-line, ofrece pocas veces información eficaz sobre mecanismos de degradación y cuando lo hace, es para envejecimientos muy avanzados.

### 2.2.6.b. Índice de Polarización

Las dificultades para modelar científicamente la corrección de este parámetro (que varía, con la temperatura y humedad) hacen que, para eliminar la dependencia de factores ambientales se empleen valores relativos de medidas de resistencia de aislamiento. El más conocido de ellos es el índice de polarización ("Polarization index", PI), definido como el cociente en Ra tras 10 min y tras 1min de aplicación de tensión:

$$PI = \frac{Ra_{10}}{Ra_1} \approx \frac{I_{sup} + I_{cond} + I_{abs}}{I_{sup} + I_{cond}} \quad (2.10)$$

Este parámetro permite emplear la corriente de absorción ( $I_{abs}$ ) como indicador de la importancia de degradación del aislamiento, en función de su valor relativo a las otras dos componentes. Si  $PI \approx 1$ , las corrientes parásitas superficiales ( $I_{sup}$ ) y/o conducción ( $I_{cond}$ ) son excesivas y hay riesgo de ruptura del sistema aislante; en caso contrario  $PI \geq 2$  [11].

## **Capítulo 3.- La aplicación del análisis de respuesta en frecuencia al diagnóstico de transformadores.**

### **3.1. Introducción: ¿qué es y para qué sirve el Análisis de la Respuesta en Frecuencia (FRA)?**

El análisis de la respuesta en frecuencia FRA ("Frequency Response Analysis") es una técnica de diagnóstico para detectar deformaciones y desplazamientos (entre otros fallos tanto eléctricos como mecánicos) de devanados de transformadores de distribución y de potencia. El FRA como técnica de diagnóstico debe integrar las mediciones 'off-line' y la interpretación de los registros para dar una valoración adecuada de la condición de los devanados. Se debe tener en cuenta que ninguna de las técnicas para estimar el estado del transformador que se han descrito en el Capítulo 2 son capaces de detectar muchos mecanismos de degradación eléctricos ni mecánicos, especialmente la detección de deformaciones, y el Análisis de Respuesta en Frecuencia sí puede hacerlo.

Sin embargo, no existe una guía de medición FRA y tampoco una metodología para la interpretación de los registros, la cual usualmente es realizada por expertos [17].

El alto porcentaje de fallos mecánicos en transformadores de potencia como consecuencia de la deformación y el desplazamiento de los devanados hace necesaria la implementación de una técnica sensible en la detección de este tipo de daño mecánico. Existen otras técnicas, aparte del Análisis de la Respuesta en frecuencia, como la medición de la impedancia de cortocircuito, la medición de la vibración mecánica, la medición de la respuesta en frecuencia de las pérdidas parásitas...Sin embargo, estudios comparativos de estas técnicas de diagnóstico señalan que la medición de la Respuesta en Frecuencia es la técnica más sensible en la detección de este tipo de fallos. Por eso, en los últimos tiempos, el análisis de respuesta en frecuencia ha sido reconocido como la técnica de monitorización más fiable para la evaluación de la deformación y el desplazamiento en los devanados de un transformador [18].

El análisis de la respuesta en frecuencia se fundamenta en el concepto de que las variaciones debidas a deformación y desplazamiento de los devanados en el transformador se reflejan en un cambio de los parámetros L, C, y R del circuito equivalente del devanado, modificando así su respuesta en frecuencia.

Por definición general el FRA consiste en realizar la medición en los devanados del transformador de la magnitud y la fase, ya sea de la Impedancia o de la función de transferencia, cuando se les aplica una señal sinusoidal en una banda amplia de frecuencias, comparando luego las mediciones con un conjunto de registros de referencia, pudiéndose tratar de registros del mismo transformador (mediciones homólogas), de registros de otro transformador con igual diseño, o también de registros pertenecientes a las otras fases del mismo transformador (mediciones Inter-Fases). [17]

Desde que Dick y Erven propusieran esta técnica para el diagnóstico de devanados de transformadores en 1978, en un artículo de IEEE titulado “Transformer diagnostic testing by frequency response analysis”, ha habido mucho interés en la promoción de los beneficios de diagnóstico asociados con FRA a través de la mejora de la capacidad de interpretar cualquier cambio observado. Una manera de abordarlo, que ha sido aceptada por muchos investigadores, ha sido el uso de un modelo de transformador basado en sus parámetros geométricos. La base lógica de esta aproximación al FRA es que un cambio en la geometría del transformador afectará a los parámetros que aparecen en el modelo.

La FRA “signature” (curva característica del FRA), que es considerada la huella dactilar del transformador, será comparada con la previa para detectar cualquier deformación mecánica que se pueda haber desarrollado entre la toma de ambas (también es útil, en otro campo, para identificar deformaciones en los devanados de máquinas rotativas). La comparación entre fases también puede ayudar a detectar la parte de la máquina más degradada. [17]

Esta definición general ha dado paso a que aspectos relacionados con la metrología FRA y el diagnóstico mismo no hayan sido unificados.

## **3.2. Modelos de transformador**

### **3.2.1. Modelo de transformador en bajas frecuencias**

#### ***3.2.1.1. Circuito equivalente de un transformador trifásico:***

El circuito equivalente de un transformador trifásico incorpora los fenómenos físicos que se producen en un transformador real a frecuencia industrial (50 ó 60 Hz), permitiendo la aplicación de las técnicas de la teoría de circuitos eléctricos en la resolución de múltiples problemas del funcionamiento de los transformadores en las redes eléctricas.

El desarrollo del circuito equivalente del transformador se inicia con la reducción de ambos arrollamientos a un mismo número de espiras.

En una aproximación simple, se podría indicar que los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente representan los fenómenos ligados a la transformación electromagnética que se produce en el núcleo ferromagnético (creación del flujo común de magnetización y pérdidas en el hierro) [19].

Por otra parte, los parámetros de la rama serie del circuito equivalente representan los fenómenos ligados al funcionamiento en carga (pérdidas de Joule en los arrollamientos, flujos dispersos y pérdidas adicionales asociadas a dichos flujos).



Todo ello conduce a una representación del circuito equivalente del transformador según la Figura 3.1, en la que aparecen los parámetros [19]:

$R_{Fe}$ : resistencia asociada a las pérdidas en el hierro.

$X_\mu$ : reactancia de magnetización.

$R_1$ : resistencia asociada al arrollamiento primario.

$R'_2$ : resistencia asociada al arrollamiento secundario reducida al primario.

$X_{\sigma 1}$ : reactancia de dispersión asociada al arrollamiento primario.

$X'_{\sigma 2}$ : reactancia de dispersión asociada al arrollamiento secundario reducida al primario.

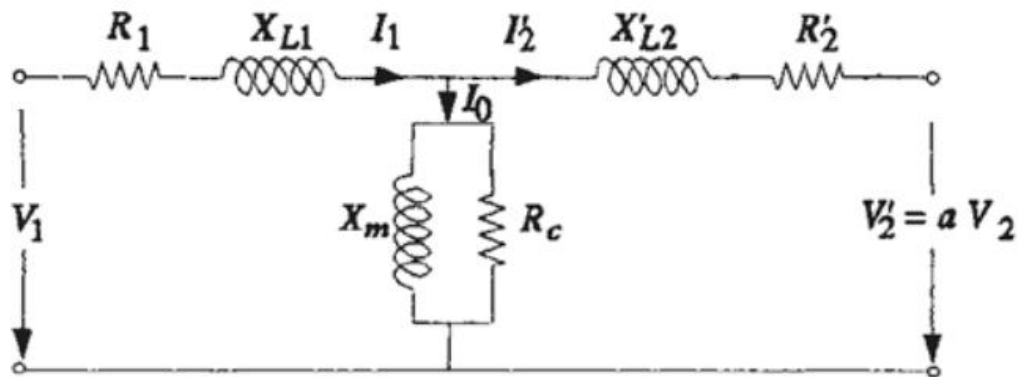


Figura 3. 1. Circuito equivalente de un transformador. [19]

En el caso de transformadores trifásicos, la representación de los fenómenos físicos se realiza de la misma forma, mediante un circuito monofásico equivalente. Los parámetros de este circuito monofásico equivalente pueden representar los fenómenos físicos por fase o por fase-neutro.

Dado que un circuito equivalente fase-neutro requiere considerar los arrollamientos conectados en estrella, en aquellos arrollamientos que estén conectados en triángulo se deberá utilizar la conversión triángulo-estrella definida por la expresión (3.1):

$$Z_{\Delta} = 3 Z_Y \quad (3.1)$$

La determinación de los parámetros del circuito equivalente de un transformador se realiza en la práctica a través de dos sencillos ensayos: el ensayo de vacío y el ensayo de cortocircuito [19].

### ***3.2.1.2. El ensayo de vacío y los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente de un transformador trifásico***

El ensayo de vacío consiste en aplicar a uno de los arrollamientos del transformador su tensión nominal, manteniendo el otro arrollamiento en circuito abierto.

En estas condiciones, se mide la potencia activa absorbida en el ensayo  $P_0$ , así como la corriente de vacío  $I_0$ , sabiendo adicionalmente que  $U_0=U_{1n}$  o  $U_0=U_{2n}$ , dependiendo del arrollamiento alimentado. La potencia  $P_0$  vendrá dada por la suma de las lecturas de los dos vatímetros montados según se indica en la Figura 3.2:

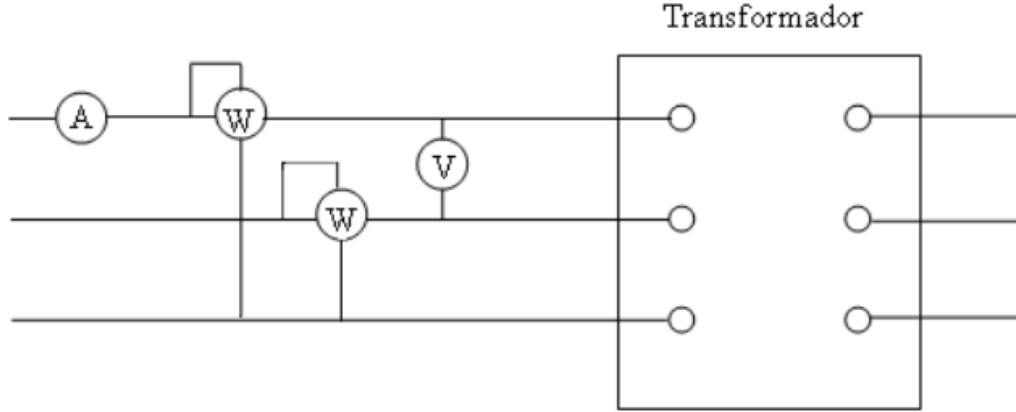


Figura 3. 2. Esquema para el ensayo de vacío. [19]

Dado que la corriente de vacío es muy inferior a la corriente asignada ( $I_0 \ll I_n$ ; en transformadores de potencia la corriente de vacío suele ser del orden de 0,1-0,5% de la corriente asignada), las pérdidas de Joule en el arrollamiento energizado se pueden considerar despreciables y por tanto la potencia de ensayo  $P_0$ , se iguala a las pérdidas en el hierro  $P_{Fe}$ .

$$P_{Fe} = P_0 = \sqrt{3}U_{0L}I_0 \cos \phi_0 \quad (3.2)$$

$$\cos \phi_0 = P_0/(\sqrt{3}U_{0L}I_0) \quad (3.3)$$

Por otra parte, al considerarse también despreciable la caída de tensión en el arrollamiento alimentado, la tensión aplicada coincide con la f.e.m que crea el flujo común [19].

De todo ello, se deduce que [19]:

$$I_{Fe} = I_0 \cos \phi_0 \quad (3.4)$$

$$R_{Fe} = U_{0fn} / I_{Fe} = (U_{0L}/\sqrt{3})/(I_0 \cos \phi_0) = U_{0L}^2/P_{Fe} \quad (3.5)$$

$$I_{\mu} = I_0 \sin \phi_0 \quad (3.6)$$

$$X_{\mu} = U_{0fn}/I_{\mu} = U_{0L}/(\sqrt{3}I_0 \sin \phi_0) \quad (3.7)$$

### 3.2.1.3. El ensayo de cortocircuito y los parámetros de la rama serie del circuito equivalente de un transformador trifásico

El ensayo de cortocircuito consiste en aplicar a uno de los arrollamientos del transformador una tensión creciente, manteniendo el otro arrollamiento en cortocircuito, hasta alcanzar la corriente asignada de plena carga de los arrollamientos.

En estas condiciones, se mide la potencia activa absorbida en el ensayo  $P_{cc}$ , así como la tensión que ha sido necesario aplicar  $U_{cc}$ , sabiendo adicionalmente que  $I_{cc} = I_{1n} = I'_{2n}$ .

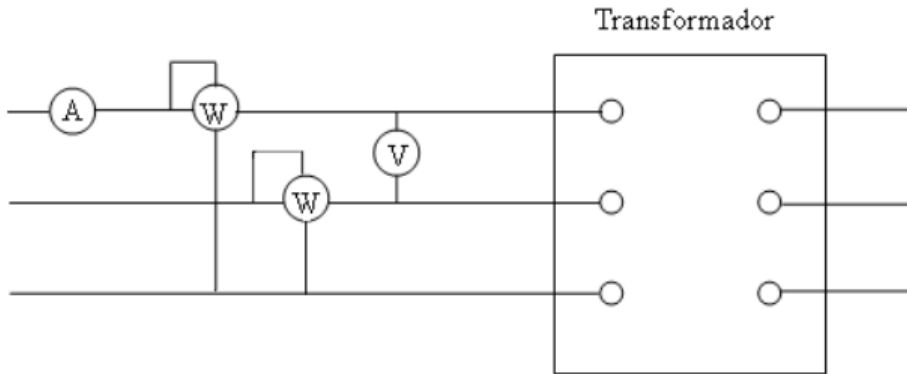


Figura 3. 3. Esquema para el ensayo de cortocircuito. [19]

Como ya se indicó en el punto anterior, la corriente de vacío es muy inferior a la corriente asignada ( $I_0 \ll I_n$ ) y por tanto despreciable frente a ésta. Además la tensión aplicada en el ensayo de cortocircuito  $U_{cc}$  será muy inferior a la tensión asignada, el flujo magnético en el núcleo será muy pequeño, siendo en consecuencia despreciables durante el ensayo las pérdidas en el hierro. Por tanto, la potencia absorbida en el ensayo de cortocircuito  $P_{cc}$  coincide con las pérdidas en el cobre o pérdidas debidas a la carga  $P_{carga}$ . [19]

En una primera aproximación se podrían deducir los parámetros de la rama serie del circuito equivalente como [19]:

$$P_{cc} = \sqrt{3} U_{ccL} I_{cc} \cos \phi_{cc} \quad (3.8)$$

$$\cos \phi_{cc} = P_{cc} / (\sqrt{3} U_{ccL} I_{cc}) \quad (3.9)$$

$$U_{Rcc} = U_{cc} \cos \phi_{cc} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} R_{cc} = R_1 + R'_2 &= \frac{U_{Rcc} f n}{I_{cc}} = \frac{U_{cc} f n \cdot \cos \phi_{cc}}{I_{cc}} = \\ &= (U_{ccL} \cdot \cos \phi_{cc}) / (\sqrt{3} I_{cc}) = P_{cc} / (3 \cdot I_{cc}^2) \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$U_{Xcc} = U_{cc} \sin \phi_{cc} \quad (3.12)$$

$$X_{cc} = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = U_{Xccfn}/I_{cc} = (U_{ccl} \cdot \text{sen } \phi_{cc})/(\sqrt{3} I_{cc}) \quad (3.13)$$

No obstante, una aproximación más rigurosa para la obtención de las resistencias de la rama serie del circuito equivalente requiere tomar en consideración algunos aspectos en la norma UNE-EN 60076-1 [19]:

- Las pérdidas debidas a la carga realmente son debidas a dos tipos de pérdidas. Por un lado están las pérdidas por efecto Joule en los arrollamientos (pérdidas óhmicas) y, por otro lado, están las pérdidas adicionales debidas a la circulación de corrientes de Foucault por los arrollamientos:

$$P_{cc} = P_{Joule} + P_{adicionales} \quad (3.14)$$

Estas corrientes de Foucault en los conductores no deben confundirse con las corrientes de Foucault en el núcleo y son creadas por los flujos de dispersión. Dependen del cuadrado de la corriente que circula por los arrollamientos y de la inversa de la resistencia.

- Por otro lado, la normativa (UNE-EN 60076-1) obliga al fabricante a entregar al cliente las pérdidas debidas a la carga a la temperatura de referencia del transformador, que, en el caso de los transformadores sumergidos en aceite, es de 75 °C. Por ello, los resultados del ensayo de cortocircuito deben extrapolarse a dicha temperatura de referencia de 75 °C.

En la práctica, especialmente en transformadores de potencia, la impedancia serie del circuito equivalente  $Z_{cc}$  viene determinada fundamentalmente por la componente reactiva ( $X_{cc} \gg R_{cc}$ ), por lo que los cálculos de corrección a la temperatura de referencia se utilizan fundamentalmente para obtener el valor de pérdidas totales en carga.

Por último, para la separación de los valores de las resistencias y reactancias entre los arrollamientos primario y secundario, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Las resistencias óhmicas de cada arrollamiento se obtendrían a partir de las medidas de resistencia teniendo en cuenta las correspondientes correcciones a la temperatura de referencia.
- ✓ Las resistencias debidas a las perdidas adicionales no se pueden desagregar entre los arrollamientos y, como aproximación, se asignarían por partes iguales a ambos ( $R_{1-adic} = R'_{2-adic} = R_{cc-adic}/2$ )
- ✓ Las reactancias de dispersión no se pueden desagregar entre los arrollamientos y, como aproximación, se asignarían por partes iguales a ambos ( $X\sigma_{1-adic} = X'\sigma_{2-adic} = X\sigma_{cc-adic}/2$ )

### 3.2.2. Modelo de transformador en altas frecuencias

Aunque el transformador es un componente de diseño relativamente fácil, ya que no tiene partes rotativas, el desarrollo de modelos adecuados para representar su comportamiento en procesos transitorios, puede ser una tarea muy compleja debido a los siguientes factores [20]:

- Existen muchos diseños de núcleo magnético y de los arrollamientos.
- Algunos parámetros del transformador tiene comportamiento no lineal, mientras que otros, son dependientes de la frecuencia.
- La determinación de algunos parámetros no es fácil y, en algunos casos se trata de una tarea que hasta la fecha, no ha sido resuelta satisfactoriamente.

En el desarrollo de un modelo preciso, se deberán tener en cuenta los siguientes atributos [20]:

- Configuración del núcleo
- Configuración de los arrollamientos
- Acoplamiento entre arrollamientos
- Flujos de dispersión
- Saturación magnética
- Pérdidas por histéresis y corrientes parásitas
- Capacidades entre espiras y entre arrollamientos

Tabla 3. 1. Importancia de algunos parámetros dependiendo del rango de frecuencias. [20]

Parámetro/Efecto	Transitorios de baja frecuencia	Transitorios de frente lento	Transitorios de frente rápido	Transitorios de frente muy rápido
Impedancia de circuito	Muy importante	Muy importante	Importante	Poco importante
Saturación	Muy importante	Importante	Poco importante	Poco importante
Pérdidas en el hierro	Importante	Importante	Poco importante	Poco importante
Corrientes parásitas	Muy importante	Importante	Poco importante	Poco importante
Acoplamiento capacitivo	Poco importante	Importante	Muy importante	Muy importante

Durante los últimos años, ha ganado gran aceptación la aplicación del principio de dualidad magnética-eléctrica. Ésta consiste en la elaboración de un circuito magnético a partir de la configuración geométrica del núcleo y de la disposición de los arrollamientos de cada fase para

posteriormente, a través de unas equivalencias entre variables magnéticas y eléctricas, convertirlo a un circuito eléctrico.

Sin embargo, en todo esto no se han incluido las capacidades existentes entre bornes terminales ni entre arrollamientos, las cuales pueden tener una influencia no despreciable en ciertos procesos transitorios. A todo ello, se suma la dificultad de hallar algunos parámetros del circuito equivalente y la ausencia de una norma que contemple esta posibilidad.

El modelo a emplear también depende del proceso transitorio a simular, es decir, en el estudio de dos transitorios bajo el mismo rango de frecuencias, la selección de un modelo depende de la información a obtener con la simulación de cada proceso. Por ejemplo, para el estudio de un proceso transitorio de frente rápido, se escogerá el modelo de la figura 3.4. (a) si interesa analizar la transferencia de tensiones entre arrollamientos de ambos lados. En cambio, se elegirá el modelo de la figura 3.4. (b) cuando el transformador funcione en vacío y no interese la transferencia de tensiones, sino la interacción del transformador con el resto de la red [20].

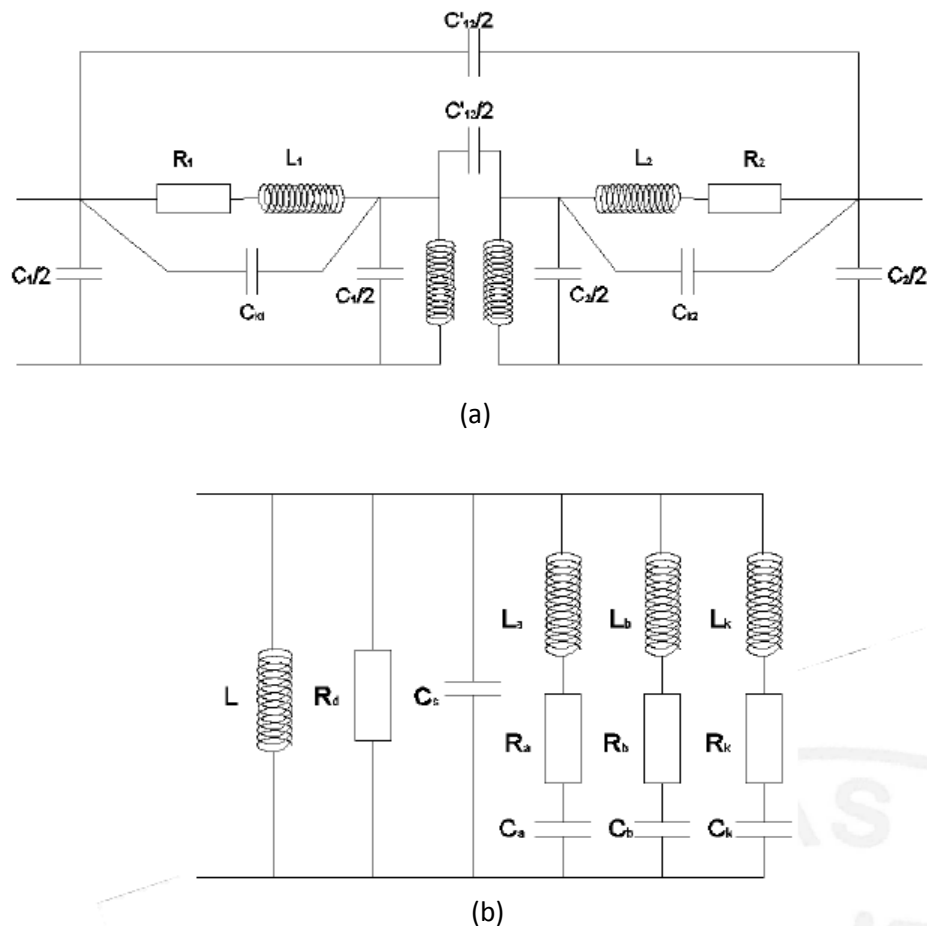


Figura 3. 4. (a) Modelo escogido para el estudio proceso transitorio de frente rápido.

(b) Modelo para un transformador que funcione en vacío. [20]

A continuación, se detalla una clasificación de la gama de frecuencias:

Tabla 3. 2. Clasificación de la gama de frecuencias. [20]

Grupo	Gama de frecuencias	Designación	Representación principalmente para
I	0,1 Hz – 3 kHz	Oscilaciones de baja frecuencia	Sobretensiones temporales
II	50 Hz – 20 kHz	Ondas de frente lento	Sobretensiones por maniobras
III	10 kHz – 3 MHz	Ondas de frente rápido	Sobretensiones por rayos
IV	100 kHz – 3 MHz	Ondas de frente muy rápido	Sobretensiones por recebado en GIS

Aún con todas las dificultades que se han presentado anteriormente, los modelos más extendidos para representar transformadores de potencia y distribución a altas frecuencias son los modelos en los que las líneas se considera que pueden representarse con un equivalente de parámetros concentrados o distribuidos, cada uno de los cuales se presenta a continuación:

### 3.2.2.1. Parámetros concentrados

Se considera que todos los circuitos eléctricos tienen tres tipos de parámetros: resistencia (R), inductancia (L) y capacidad (C). Todos los componentes presentan estas tres características en mayor o menor grado, pero, en el régimen permanente, una de ellas predomina sobre las otras, por ejemplo, la característica resistiva predomina en las resistencias, la inductiva en las bobinas y la característica capacitiva es la predominante en los condensadores.

Estos tres parámetros están distribuidos, es decir, cada pequeña parte del circuito posee una porción de estos parámetros. Sin embargo, lo más habitual para el estudio de los circuitos eléctricos es considerar que están concentrados en un punto. En cambio, en líneas de transporte largas, esta aproximación no es adecuada y habrá que considerar un modelo de parámetros distribuidos. Los transitorios en circuitos de parámetros distribuidos se estudiarán en el apartado siguiente. [21].

Los parámetros L y C se caracterizan por su habilidad para almacenar energía, de tipo magnético en las bobinas y de tipo eléctrico en los condensadores. La energía magnética ( $U$ ) almacenada en una bobina es función de la corriente  $i$  instantánea y su expresión es [21]:

$$U = \frac{1}{2} Li^2 \quad (3.15)$$

La energía eléctrica ( $\varepsilon$ ) almacenada en un condensador es función de la tensión  $u$  instantánea, viene dada por la expresión [21]:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (3.16)$$

Por el contrario, el parámetro R es un disipador de energía, siendo la tasa de disipación de energía igual a [21]:

$$P = Ri^2 \quad (3.17)$$

### 3.2.2.2. Parámetros distribuidos

Hasta ahora se han estudiado transitorios en circuitos que podían considerarse como parámetros concentrados. Cuando se estudian los transitorios en líneas de longitud larga, ya no es adecuado realizar dicha simplificación y es necesario acudir a un modelo de la línea de parámetros distribuidos, en el que  $R'$ ,  $L'$  y  $C'$  son la resistencia, inductancia y capacidad por unidad de longitud.

Una característica de los circuitos con parámetros distribuidos es la capacidad de transportar ondas viajeras de tensión y corriente. En el caso de una línea larga, si se aplica tensión en el extremo inicial de la línea, dicha tensión no aparece instantáneamente en el extremo final (como ocurre si representamos la línea por su impedancia serie), sino que una onda de tensión viaja de un extremo a otro, requiriendo de un determinado tiempo para que la onda de tensión alcance el extremo final. Lo mismo ocurre con la onda de corriente. Podría utilizarse un símil mecánico para explicar el fenómeno: cuando una tubería suficientemente larga empieza a llenarse de agua por un extremo, sabemos que el agua alcanzará el otro extremo de la tubería transcurrido un determinado tiempo, en función de la velocidad del agua y de la longitud de la tubería [21].

En lo que sigue se va a considerar líneas ideales, esto es, líneas sin pérdidas ( $R'=0$ ).

#### 3.2.2.2.1. Ecuaciones de la línea ideal

Se considera un elemento diferencial de línea, de longitud  $dx$ , como el de la figura 3.5. En cualquier punto de la línea, la tensión y la corriente son funciones de  $x$  y de  $t$  ( $u = u(x, t)$  e  $i = i(x, t)$ ).

Planteando las ecuaciones de Kirchhoff y simplificando, llegamos a que las ecuaciones que relacionan tensiones y corrientes, en cualquier punto y en cualquier instante, para el caso de línea sin pérdidas, se reducen a las siguientes [21]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L' \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C' \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.19)$$



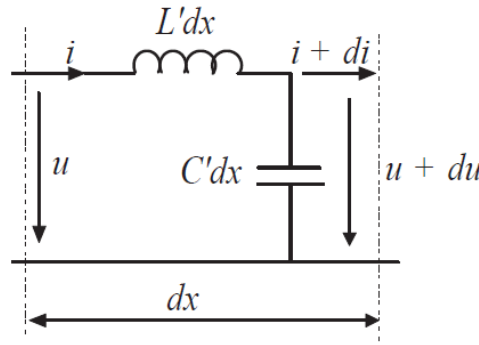


Figura 3. 5. Elemento diferencial de una línea de transporte ideal. [21]

donde se asume que los parámetros  $L'$  y  $C'$  (inductancia y capacidad por unidad de longitud) son constantes [21].

Tomando derivadas parciales con respecto a  $x$  en la primera ecuación y con respecto a  $t$  en la segunda, se llega a que:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L' C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.20)$$

Y de la misma forma, tomando derivadas parciales a la inversa, se obtiene una ecuación similar para las corrientes:

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L' C' \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (3.21)$$

Ambas ecuaciones (3.20) y (3.21) constituyen las ecuaciones de onda de la línea, también llamadas ecuaciones de onda viajera, que pueden ser escritas como:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (3.23)$$

Donde

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' C'}} \quad (3.24)$$

Representa la velocidad de propagación de las ondas de tensión y corriente a lo largo de la línea. Si las unidades de  $L'$  y  $C'$  son  $H/m$  y  $F/m$  respectivamente, la velocidad de propagación  $v$  viene dada en  $m/s$  [21].

### 3.3. Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA)

Cuando un transformador conectado a la red se somete a un cortocircuito, experimenta un aumento considerable del flujo de corriente durante la duración de la falta externa. La magnitud resultante de la corriente de falta suele ser mucho más alta que la corriente normal

de servicio (en algunos casos hasta 20 veces mayor) debido a que ya no está limitada por la impedancia de carga y sólo puede ser limitada por la impedancia del transformador. La amplitud de la corriente del primer pico puede llegar a casi el doble del valor con respecto a la corriente de cortocircuito en estado estacionario.

Las corrientes de falta a través del bobinado del transformador (al igual que las corrientes de carga normales), crean un campo magnético en el espacio entre los bobinados. Éste, llamado flujo de dispersión, se suma al flujo en el núcleo de magnetización normal, y la resultante, la reactancia de dispersión o impedancia de cortocircuito, es el principal factor en la limitación de las corrientes de cortocircuito y uno de los parámetros de funcionamiento específicos principales en los transformadores. A lo largo de la mayor parte de la altura axial de las bobinas de un transformador de columnas, la interacción entre el flujo de dispersión predominantemente axial y la corriente circunferencial del bobinado da como resultado fuerzas electromagnéticas radiales en las bobinas, que tienden a separar ambas bobinas. Las más importantes de éstas son las fuerzas internas en el bobinado interior, lo cual puede resultar en el colapso de la bobina, denominado "buckling" o pandeo radial. En los extremos de las bobinas de un transformador de columnas, el flujo de fuga ya no es puramente axial y atraviesa ambas bobinas. La interacción entre la componente radial de este campo y las corrientes de los bobinados produce fuerzas electromagnéticas que actúan en sentido axial y que tienden a comprimir las bobinas. Una muy alta presión en el bobinado puede dar lugar a la inclinación de los conductores individuales en la bobina (se denomina "tilting").

En el diseño y la fabricación de transformadores de gran tamaño se debe prestar especial atención en asegurar que ambas bobinas sean simétricas alrededor de sus centros electromagnéticos. Si esto no se hace o si hay algún desplazamiento posterior que resulte en la contracción del aislamiento, por ejemplo, los esfuerzos electromagnéticos ya no están equilibrados y pueden ser mucho mayores que las fuerzas axiales netas que actúan en las bobinas individuales [22].

Debido, por lo tanto, a las fuerzas radiales y axiales que actúan sobre bobinas, los modos de deformación importante causados por las corrientes de falta son [22]:

- Pandeo radial o "radial bukling";
- Inclinación de conductores o "tilting";
- Flexión de los conductores entre los espaciadores soporte, distorsión local de las bobinas "bending" o flexión;
- Colapso de los soportes de las bobinas;
- Movimiento del conexionado de las bobinas. Por ejemplo, en el conexionado de la bobina de regulación al conmutador bajo carga.

### 3.3.1. Teoría de FRA

Existe una relación directa entre la configuración geométrica y la distribución eléctrica de los elementos, también conocida como redes RLC, de un transformador. Esta red RLC puede ser

identificada mediante la dependencia en la frecuencia de su función transferencia. La función de transferencia  $H(j\omega)$  se define como la relación entre la señal de salida y la señal de entrada de un cuadripolo pasivo mostrada en la forma de la transformada de Laplace. La distribución de polos y ceros de la función de transferencia está estrechamente relacionada con los parámetros internos, el método de conexión y la impedancia de los terminales de conexión de la red.

$$H(j\omega) = \frac{\text{Señal}_{\text{salida}}(j\omega)}{\text{Señal}_{\text{entrada}}(j\omega)} \quad (3.25)$$

Un cuadripolo es una red con un par de terminales de entrada y un par de terminales de salida. Si una red se compone de resistencias lineales, inductancias (incluyendo la inductancia mutua) y la capacidades, y no hay ninguna fuente de alimentación independiente en el interior, este se denomina pasivo (Figura 3.6). El bobinado del transformador puede ser considerado como un cuadripolo pasivo a altas frecuencias. Las propiedades reactivas de una muestra de prueba son dependientes y sensibles a los cambios en la frecuencia.

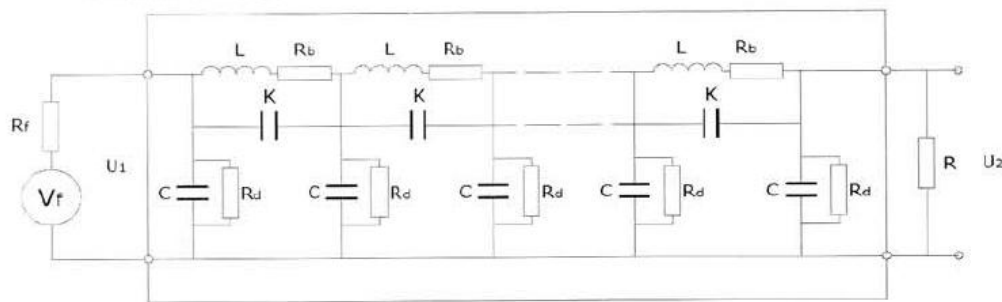


Figura 3. 6. Cuadripolo pasivo. [22]

El ensayo de análisis de respuesta en frecuencia puede ser realizado con precisión mediante el método de barrido en frecuencia (SFRA, "Sweep Frequency Response Analysis"), que es el proceso por el cual se mide la respuesta en frecuencia del cuadripolo pasivo cuando se inyecta una señal de frecuencia variable. La respuesta en frecuencia es la relación entre  $H(j\omega)$  y  $\omega$  (frecuencia angular de la red) cuando se alimenta al circuito con una señal senoidal constante en amplitud. La variación de la amplitud de  $H(j\omega)$  en función de  $\omega$  es generalmente denominada como respuesta en frecuencia de amplitud, mientras que la variación de la fase de  $H(j\omega)$  en función de  $\omega$  se conoce como fase de la respuesta en frecuencia. Los cambios en la configuración geométrica cambian la red de impedancia y, a su vez, alteran la función de transferencia. Los cambios en la función de transferencia pueden revelar una amplia gama de modos de fallo.

La técnica FRA proporciona información interna de diagnóstico y es no invasiva. Uno de los objetivos principales es determinar se comporta la impedancia, aparte de la función de transferencia, de un espécimen bajo ensayo en un rango determinado de frecuencias. La impedancia es una red distribuida de componentes eléctricos reales y reactivos (cuadripolo).

El cambio de impedancia frente a la frecuencia puede ser dramático en muchos casos. Este comportamiento se vuelve evidente cuando se modela la red de impedancias en función de la frecuencia. El resultado es la representación de la función de transferencia de la red RLC en el dominio de la frecuencia. Es importante entender la diferencia entre el dispositivo físico y el modelo matemático que se va a utilizar.

Cuando los sistemas analizados eléctricamente son grandes y complejos, contienen los parámetros eléctricos en forma distribuida. Una red distribuida contiene una cantidad infinita de elementos RLC infinitesimales. Es práctico para modelar este tipo de sistemas distribuidos agrupar los componentes RLC, dando como resultado una red concentrada. Agrupar elementos para una sola frecuencia es una tarea relativamente sencilla; sin embargo, cuando el sistema modelado abarca más de un intervalo de frecuencia significativo, producir un modelo adecuado concentrado se hace más difícil.

Cuando un transformador se somete a la prueba FRA, los cables de prueba están configurados de manera que se utilicen cuatro terminales. Estos cuatro terminales se pueden dividir en dos pares, un par para la entrada y un par para la salida del cuadripolo.

La función de transferencia de una red RLC es la respuesta en frecuencia de la relación entre la salida y entrada cuando las condiciones iniciales de la red son iguales a cero. Las relaciones tanto de la magnitud y la fase se pueden extraer de la función de transferencia. Ésta ayuda a comprender mejor la relación entrada-salida de una red RLC. La función de transferencia también representa las características fundamentales de la red y es una herramienta útil en el modelado de un sistema. El objetivo de la FRA por lo tanto es medir el modelo de impedancia de la muestra [22].

A menudo es útil graficar la relación de la magnitud y la fase de la función de transferencia. Un método común es usar el diagrama de Bode. El diagrama de Bode de la magnitud y la fase da la siguiente información [22]:

$$A(dB) = 20 \cdot \log(H(j\omega)) \quad (3.26)$$

$$A(\theta) = \tan^{-1}(H(j\omega)) \quad (3.27)$$

### 3.3.2. Principio del ensayo

En el caso de que un bobinado sufra una deformación, los parámetros de la inductancia distribuida, capacidad, etc. del devanado inevitablemente cambian, lo que conduce a un cambio en los ceros y en los polos de su función transferencia  $H(j\omega)$ , por lo que la curva característica también cambiará.

Para detectar la deformación del bobinado del transformador por el método de análisis de respuesta en frecuencia se debe poner a prueba la característica de respuesta en frecuencia de amplitud de cada arrollamiento del transformador, llevar a cabo la comparación transversal y longitudinal de los resultados de la prueba y, finalmente, juzgar la posible deformación de

bobinados de transformadores de acuerdo con las diferencias que aparezcan en la curva de la amplitud de la función transferencia en función de la frecuencia.

La característica de respuesta en frecuencia de la amplitud del bobinado del transformador se obtiene utilizando el método de barrido de frecuencia. Cambiando continuamente la frecuencia de la onda senoidal de la fuente de alimentación  $U_f$  (frecuencia angular  $\omega = 2\pi f$ , se mide la relación de la amplitud de la señal de salida  $U_2$  con respecto a la señal de entrada  $U_1$  para las diferentes frecuencias y se obtiene la curva de respuesta en frecuencia de amplitud del bobinado. En la Figura 3.6:  $L$ ,  $K$  y  $C$ , respectivamente, representan la inductancia distribuida, la capacitancia distribuida por unidad de longitud de las bobinas y la capacidad distribuida a tierra;  $U_1$  y  $U_2$ , respectivamente, representan la tensión en la entrada y la salida de la red equivalente;  $U_f$  es la tensión de la onda senoidal de la fuente;  $R_f$  es la impedancia de salida de la fuente y  $R$  es la resistencia de adaptación de la salida [22].

La respuesta en frecuencia de la amplitud obtenida normalmente se muestra en un gráfico logarítmico como se muestra en la Figura 3.7.

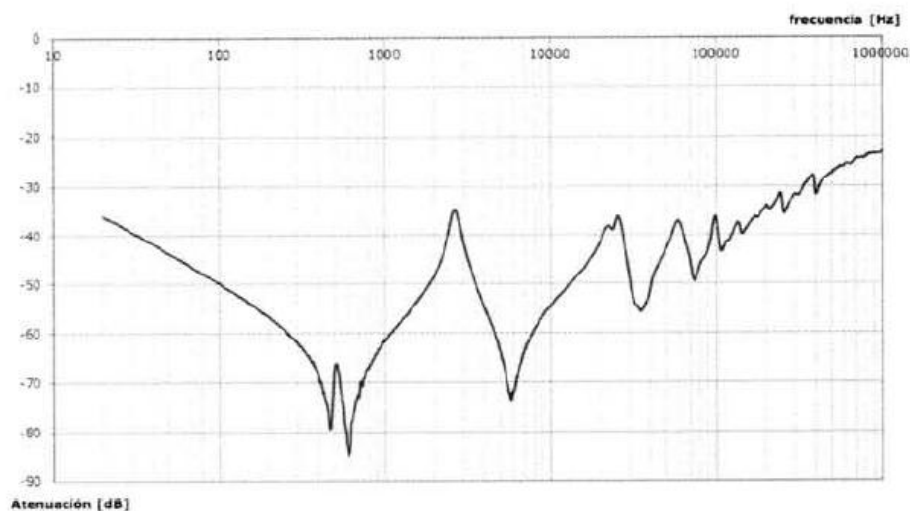


Figura 3. 7. Ejemplo de representación de un gráfico de FRA. [22]

### 3.3.3. Aplicación

Existen dos categorías distintas para la aplicación de medidas de respuesta en frecuencia: en la fábrica y en el campo. En ambos casos, los procedimientos y precauciones para generar una buena medida son los mismos. Sin embargo, hay una diferencia en la motivación de las pruebas en cada categoría [22]:

#### 3.3.3.1. Aplicación en fábrica:

Hay dos razones para generar medidas de respuesta en frecuencia dentro de un ambiente de fábrica [22]:

- Garantía de calidad;
- Base de referencia antes del transporte;

### **3.3.3.2. Aplicación en campo:**

Las dos razones distintas que generan la necesidad de realizar el ensayo en campo son [22]:

- Reubicación de la unidad (después del transporte desde fábrica o relocalización de la unidad);
- Tras un incidente: un rayo, faltas eléctricas, corto circuito, un evento sísmico, etc.

### **3.3.4. Tipos de prueba FRA. Tipos de prueba y conexiones**

Para hacer una medición de FRA, una tensión (de frecuencia variable) se suministra a un terminal del transformador. La tensión medida en el terminal de entrada se utiliza como referencia para el cálculo de FRA. Un segundo parámetro (señal de respuesta) medido es, por lo general, una tensión que se toma sobre un segundo terminal del transformador (que también puede ser una corriente medida en el terminal de entrada o en algún otro terminal a tierra). La amplitud de la respuesta FRA será entonces la relación en decibelios entre la señal de respuesta ( $V_r$ ) y el voltaje de la fuente ( $V_f$ ) [22].

Las siguientes configuraciones de conexión de los cables de medición recomendadas por la bibliografía son [22]:

- Extremo a extremo abierto, "End to end open" (figuras 3.8(a) y 3.8(b))
- Extremo a extremo en cortocircuito, "End to end short-circuit" (figuras 3.8(c) y 3.8(d))
- Capacitiva entre bobinados, "Capacitive inter-winding" (figura 3(e))
- Inductiva entre bobinados, "Inductive inter-winding" (figura 3(f))

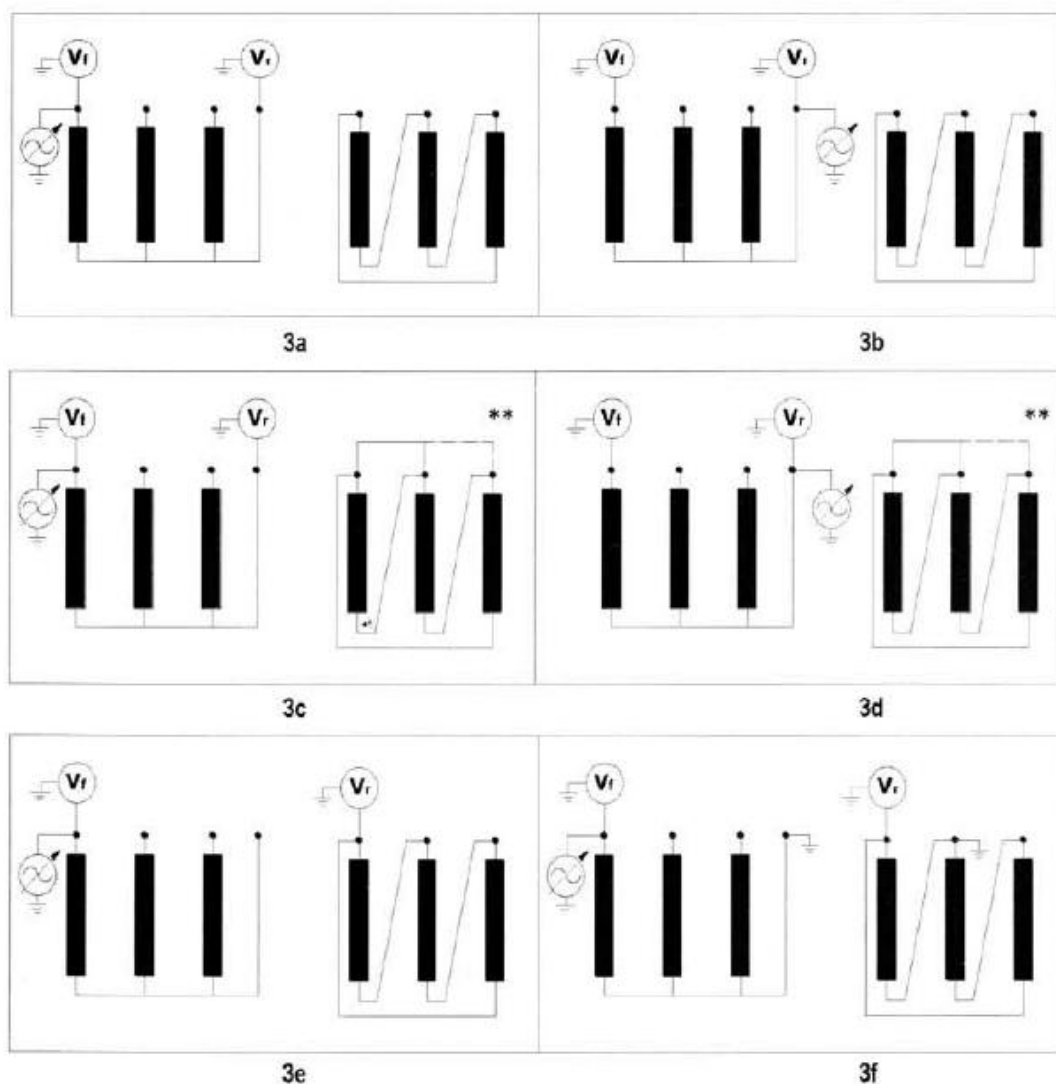


Figura 3. 8. Conexiones. [22]

- (a) Extremo a extremo abierto (fuente en terminal de fase)\*
- (b) Extremo a extremo abierto (fuente en terminal de neutro)
- (c) Extremo a extremo en cortocircuito (fuente en terminal de fase)\*
- (d) Extremo a extremo en cortocircuito (fuente en terminal de neutro)\*
- (e) Capacitiva entre bobinados
- (f) Inductiva entre bobinados

\*De extremo a extremo (abierto y cortocircuito) las pruebas pueden realizarse en cualquier dirección, es decir, con la fuente aplicada en el terminal fase o en el terminal neutro.

NOTA: Para transformadores trifásicos, hay dos opciones para generar el cortocircuito: por fases o trifásico. Para los autotransformadores, las pruebas de extremo a extremo se pueden hacer a través del arrollamiento serie, el devanado común o la serie y las bobinas en común.

### 3.3.5. Rango de frecuencia de Interpretación

Para la interpretación del ensayo de FRA se debe tener en cuenta que para diferentes anchos de banda de frecuencia, las condiciones físicas del transformador se manifiestan en mayor o menor medida. Así, para bajas frecuencias (menores a 5kHz) se debe tener especial cuidado en la magnetización residual del núcleo. En el caso de altas frecuencias se debe tener especial cuidado con los problemas de repetibilidad debido a las variaciones en los conexiones de las bobinas a los aisladores y, también, a los cables de medición. Por lo dicho, para poder realizar una buena interpretación de los resultados del ensayo es recomendable que se tengan en cuenta los anchos de bandas sombreados en la Figura 3. 13 [22].

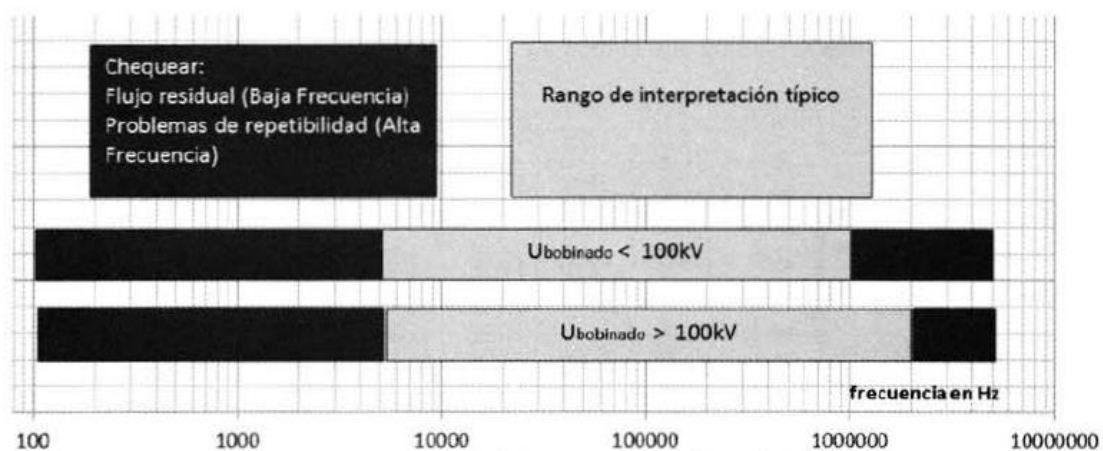


Figura 3. 9. Rangos de interpretación típicos de FRA. [22].

### 3.3.6. Metodología de interpretación de los resultados

FRA es un método comparativo para evaluar el estado de los transformadores de potencia. Para evaluar los resultados del FRA, los datos reales se comparan con los datos de referencia, ya sea por inspección visual directa de las curvas o mediante el uso de los datos procesados [22].

Hay tres métodos para la generación de datos de referencia [22]:

- Las mediciones anteriores realizadas en la misma unidad
- Mediciones en transformadores idénticos (gemelos)
- Las mediciones entre fases de un mismo nivel de tensión



### *3.3.6.1. Evaluación de los resultados comparando con mediciones anteriores*

Esta prueba es la que potencialmente puede arrojar la mayor cantidad de información de confianza para la comparación entre ambas curvas. Suponiendo una alta repetibilidad de la técnica de prueba, es posible obtener resultados de FRA casi idénticos [22].

### *3.3.6.2. Comparación con unidades gemelas*

Si los datos anteriores de la misma unidad no están disponibles para realizar la comparación de las curvas se pueden utilizar máquinas gemelas

Transformadores diseñados de manera idéntica y montados de forma idéntica (gemelos) suelen mostrar curvas de FRA casi idénticas. Se generan ligeras desviaciones entre los dos transformadores exclusivamente por tolerancias de fabricación o efectos principales magnetización [22].

### *3.3.6.3. Simetría de los devanados de un transformador*

Una última forma de comparación de resultados es la que resulta de comparar diferentes fases de un transformador entre sí. Los fallos mecánicos en los bobinados de transformadores por lo general no generan desplazamientos simétricos. Por lo tanto, comparar los resultados de FRA de las diferentes fases entre sí puede ser un método adecuado para evaluar el estado mecánico. La ubicación del arrollamiento con respecto al núcleo y la forma de este último puede provocar asimetría entre los arrollamientos de diferentes fases. La Figura 3.10 muestra la comparación entre sí de los tres arrollamientos de AT de un transformador trifásico [22].

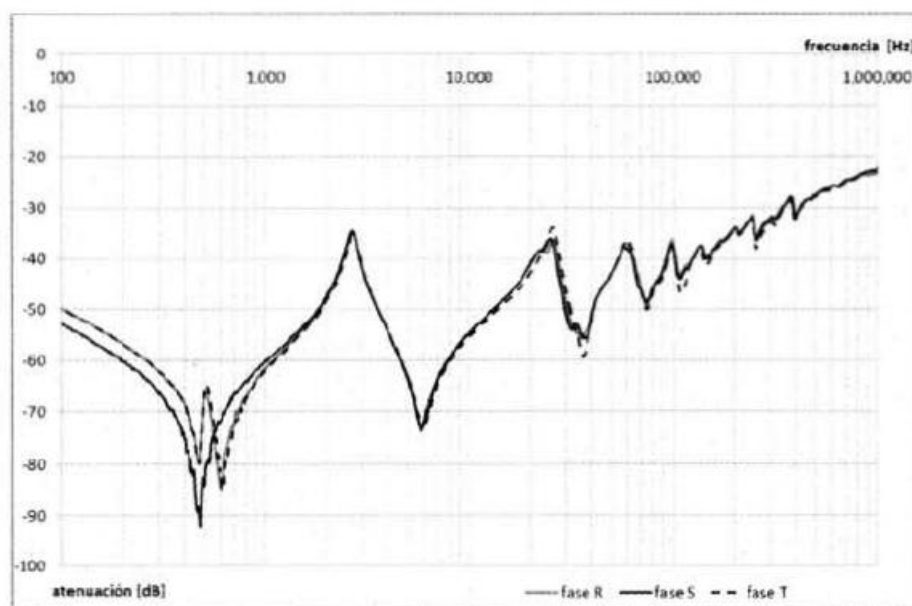


Figura 3. 10. Comparación entre los tres arrollamientos de un transformador trifásico. [22]

### 3.3.7. Análisis y determinación de deformaciones en los arrollamientos

Para juzgar la deformación de un arrollamiento del transformador por el método de análisis de respuesta en frecuencia principalmente se debe llevar a cabo el estudio de la comparación longitudinal (en frecuencia) o transversal (en amplitud de la atenuación) de las características de respuesta de amplitud de frecuencia de los bobinados y de la forma global de las curvas. Además se debe recoger la mayor cantidad de información posible, como por ejemplo, si ha habido algún tipo de falta, planos constructivos del transformador, DGA (análisis de gases disueltos en el aceite), etc. La magnitud de los factores relativos puede directamente indicar un cambio en la característica de la magnitud de la respuesta en frecuencia del arrollamiento, que puede ser usado generalmente como un medio auxiliar para juzgar la deformación del bobinado. Adicionalmente se puede utilizar un método estadístico de correlación de los datos propuesto por la norma DL/T 911:2004, que es el factor de correlación y se utilizará para la parte experimental de este trabajo.

La curva característica de amplitud de la respuesta en frecuencia de los bobinados del transformador, por lo general, tiene varias crestas y valles. La experiencia y el análisis teórico han demostrado que los cambios de la distribución de la posición y el número de crestas y valles son base importante para el análisis de la deformación de los bobinados del transformador.

Si se producen cambios evidentes en las crestas y los valles de las ondas en la banda de baja frecuencia (1kHz - 100kHz) de la curva característica de respuesta en frecuencia de la amplitud, por lo general indican que la inductancia de los bobinados cambió y pudo haber un corto circuito entre espiras o discos. Cuando la frecuencia es baja, la reactancia capacitiva resultado de la capacidad de la bobina (a tierra) y la capacidad entre discos es mayor, mientras que la reactancia inductiva es menor. Si la inductancia del bobinado cambia, conducirá a un desplazamiento evidente de las crestas y valles de la onda en la banda de baja frecuencia de la curva característica de respuesta en frecuencia de la amplitud. Para la mayoría de los transformadores trifásicos, las curvas características de respuesta en frecuencia de sus devanados en las bandas de baja frecuencia son similares. Por lo tanto, en caso de diferencia, deberá realizarse una investigación para encontrar la razón de la misma.

En el caso de que la posición de las crestas y los valles de la curva característica de respuesta en frecuencia de la amplitud cambie, dentro de la banda de frecuencias medias (100kHz - 600kHz), por lo general indica deformación local de los bobinados tales como distorsiones, abultamientos, etc. En este ancho de banda existe más cantidad de crestas y valles que en la anterior banda, por lo que se evidencian con mayor sensibilidad los cambios en la inductancia y la capacitancia distribuidas de bobinado.

En el caso de la banda de alta frecuencia (> 600kHz) los cambios, por lo general, indican un cambio de la capacitancia a tierra del bobinado, y puede haber desplazamiento de la totalidad de la bobina o de los conductores que componen el conexionado. En el caso de frecuencias altas, la reactancia inductiva del bobinado es más alta, mientras que la reactancia capacitiva es

menor. Dado que la capacidad entre discos es mucho mayor que la de tierra, la posición de la distribución de las crestas y valles de la onda está afectada principalmente por la capacitancia a tierra [22].

### 3.4. Capacidad diagnóstica del FRA: Ejemplos de diagnóstico de fallos.

#### 3.4.1. Caso 1: BAGHERI [23]

En este estudio, se utilizó un transformador de 400-MVA que había fallado para comparar la efectividad de las mediciones del Análisis de Respuesta en Frecuencia para la detectar fallos. Los principales parámetros del transformador se dan en la Tabla 3.3.

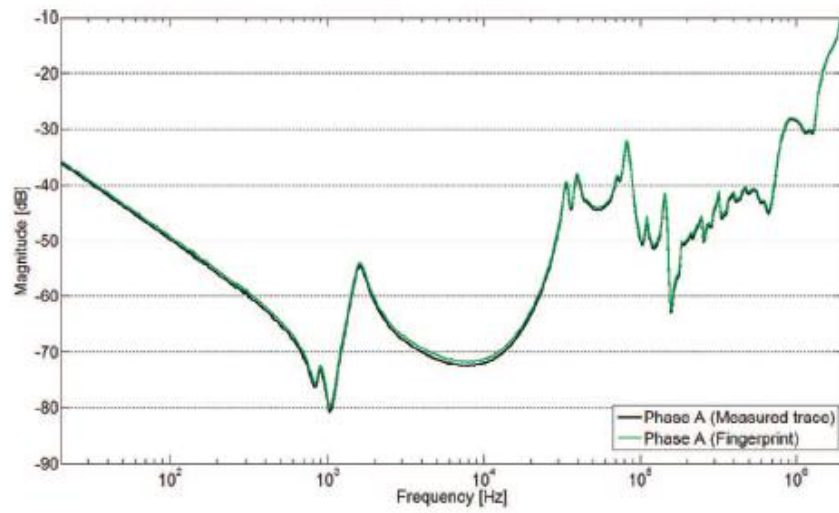
Tabla 3. 3. Parámetros del transformador de 400 MVA utilizado. [23]

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Fecha de fabricación	Mayo de 1993	Número de ventiladores	12
Tensión nominal (kV)	242/20	Numero de fases	3
Potencia nominal (MVA)	400	Frecuencia (Hz)	50
Intensidad nominal (A)	954/11.550	Tipo de ventilación	OFAF

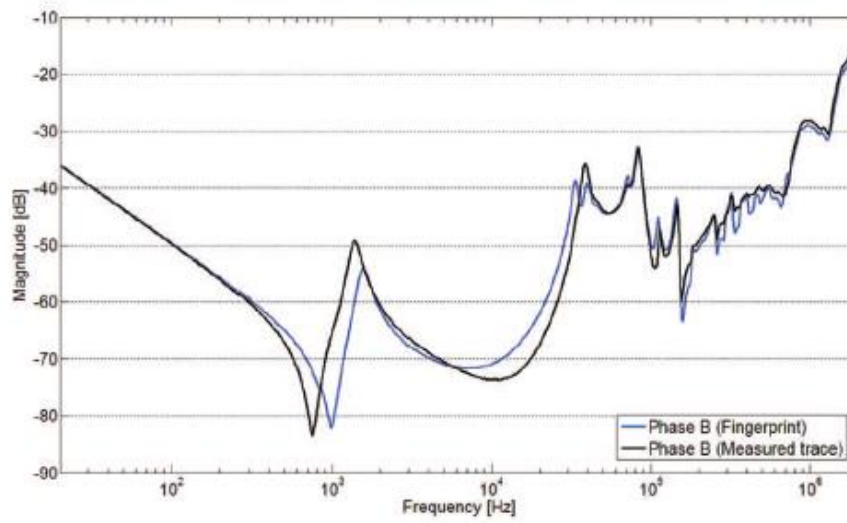
##### 3.4.1.1. Medidas hechas para el Análisis de Respuesta en Frecuencia:

Las medidas del Análisis de Respuesta en Frecuencia se hicieron inyectando una señal de tensión de 5,66 V a través de cada devanado, en 801 frecuencias en el rango de 20 Hz a 2 MHz. La impedancia característica de los cables de medida fue de 50  $\Omega$ . Las curvas características del FRA que se obtuvieron se compararon con las curvas características obtenidas durante la revisión del transformador (antes de la falta).

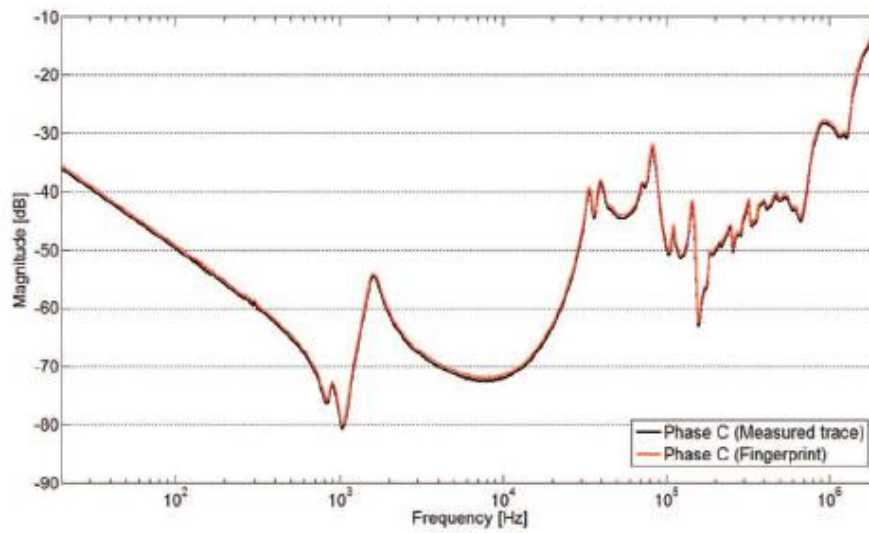
Los resultados se muestran en la Figura 3.11. Para que los datos de altas frecuencias pudieran observarse de manera clara, las magnitudes de respuesta en frecuencia se presentan en las figuras 3.11(a), 3.11 (b), y 3.11(c). Se observa que las curvas características obtenidas para las fases A y C son muy similares a sus curvas características originales. Sin embargo, no puede decirse lo mismo de la fase B. La Figura 3.11 (d) muestra la impedancia medida y la original para la fase B.



(a)



(b)



(c)

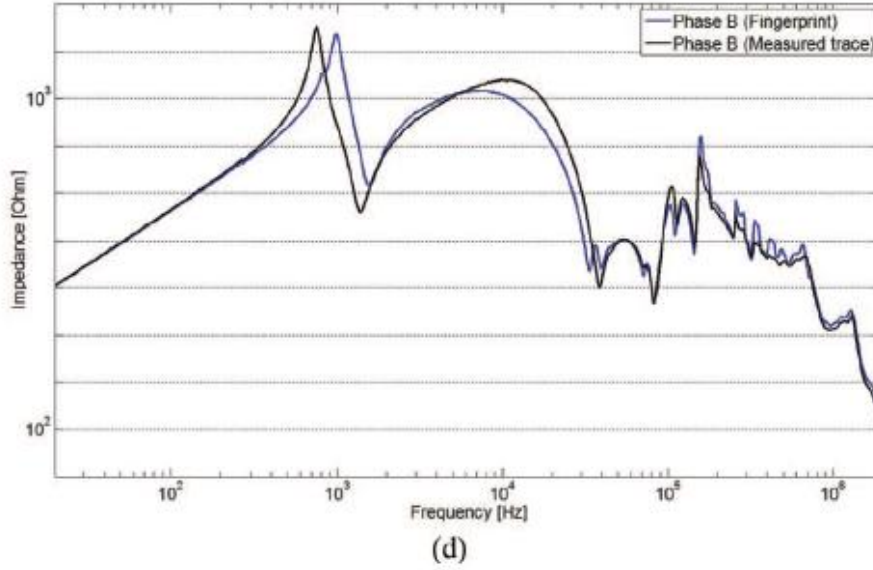


Figura 3. 11. (a), (b) y (c) muestran las magnitudes características originales y medidas para las fases A, B y C, respectivamente, para el lado de alta tensión del transformador. (d) muestra las impedancias características originales y medidas para la fase B. [23]

Un método común de interpretar los datos de FRA es utilizar índices estadísticos, en particular el coeficiente de correlación y la desviación estándar [23].

El coeficiente de correlación (CC) se define como:

$$CC_{(X,Y)} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i)^2 \sum_{i=1}^N (Y_i)^2}} \quad (3.28)$$

donde  $X_i$  e  $Y_i$  son los elementos de orden  $i$  del de curvas características originales y medidas, respectivamente y  $N$  es el número de elementos (o muestras). CC es por lo tanto un número cuyo valor absoluto se encuentra entre 0 y 1 [23].

La desviación estándar (SD, "Standard Deviation") se define como:

$$SD_{(X,Y)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{N-1}} \quad (3.29)$$

donde  $X_i$ ,  $Y_i$ , y  $N$  tienen el mismo significado que se ha explicado anteriormente para CC. CC y SD han sido evaluadas en diferentes rangos de frecuencia dependiendo de la bibliografía, pero los límites de la banda difieren entre autores. En un estudio a fondo (Nirgude, 2008), varios devanados de un transformador se deformaron gradualmente en las direcciones radiales y axiales, más de un 1%, y se calcularon los valores de CC y SD en cada paso. Se concluyó que sería apropiado utilizar los valores de CC y SD como indicadores de la deformación de los devanados en cualquier banda de frecuencia dentro del rango de 10 Hz a 3 MHz. Estos criterios

fueron adoptados por los autores de este trabajo, que hicieron los cálculos en la banda de frecuencia de 20 Hz a 2 MHz.

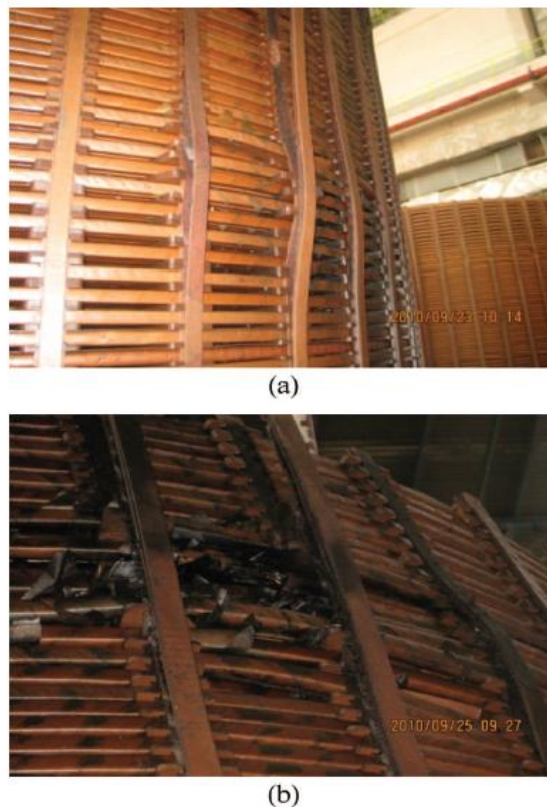
Los datos de respuesta en frecuencia pueden dividirse en tres grupos: bajas, medias y altas frecuencias. En Measurement of Frequency Response (IEC Standard 60076-18) se indica que los datos en bajas frecuencias están dominados por el núcleo del transformador, por la estructura de los devanados en las frecuencias medias, y por los cables de conexión a altas frecuencias. Sin embargo, los límites entre las bandas de frecuencia no están formalmente definidos [23].

Los valores calculados de CC y SD para cada una de las tres fases se muestran en la Tabla 3.4. Se puede observar que, para la fase B, CC y SD indican deformación. No hay ningún indicativo de deformación de la fase A o C.

**Tabla 3. 4. Valores del Coeficiente de Correlación (CC) y de la Desviación Estándar (SD). [23]**

Rango de frecuencias	CC			SD		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
<b>20 Hz a 2 MHz</b>	0,9999	0,9977	1	0,5859	3,6367	0,5004

Estas indicaciones se comprobaron mediante inspección interna después de sacar de la cuba el transformador. La Figura 3.12 muestra las vistas lateral y frontal de la fase B del bobinado de alta tensión. Es evidente que el devanado había sufrido una ligera deformación.



**Figura 3. 12. Deformación de la fase B del devanado de alta tensión. (a) Vista lateral de los discos a altura media. (b) Vista frontal de los discos superiores. [23]**

### 3.4.1.2. Discusión

Los resultados que se presentaron en este artículo concluyeron que el Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) es capaz de proporcionar información fiable sobre el nivel de deformación de los devanados de transformadores, basándose en los valores obtenidos para el Coeficiente de Correlación y la Desviación Estándar. Sin embargo, no proporcionó información sobre el tipo de deformación y hubiese sido necesaria una interpretación más precisa de los datos del FRA.

### 3.4.2. Caso 2: ISLAM [24]

En 1996, Syed M. Islam y Gerard Ledwich propusieron un método para la detección de fallos en transformadores con un modelo a altas frecuencias para la Universidad de Newcastle, Australia [24].

Para el modelado del transformador, utilizaron el modelo de parámetros distribuidos que se explica en el punto 3.2 de este capítulo, ya que existen documentos (Q. Su, R. E. James (1992), A. Miki, T. Hosoya, K. Okuyama (1978)) que prueban que cualquier cambio en los parámetros distribuidos de este modelo deberá mostrar cambios en la representación de la función de transferencia. .

Para el modelado del transformador, despreciar las conductancias derivadas en el circuito equivalente supone no poder estudiar las corrientes de fuga dentro del transformador debidas al daño del aislamiento, a daños en la protección de tierra, abrasión, puntos calientes, etc. Aunque un modelo así puede verificar, mediante la función de transferencia medida, la existencia de cortocircuitos de bobina, interdiscos, intradiscos, desplazamiento de devanados, etc, éste necesita ser modificado para poder estudiar fallos de fuga y descargas parciales en el devanado.

El modelo se modifica para incluir parámetros que permitan la simulación de fugas a tierra y vacuolas en el aislamiento. El primer modelo propuesto por los autores empleaba conductancias distribuidas de fuga a tierra, mientras que en este nuevo, se mejoró con una vacuola en serie con la capacidad distribuida como se muestra en la figura 3.13 ( $C_v$ ) [24].

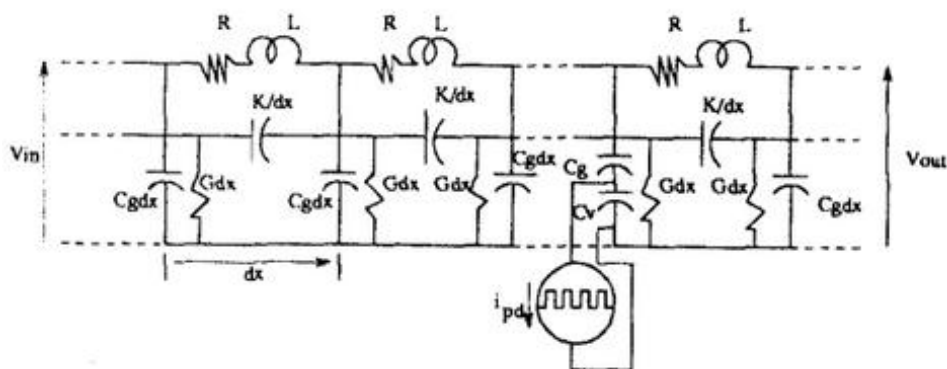


Figura 3. 13. Modelo distribuido propuesto para un transformador. [24]



El circuito equivalente propuesto se basa en los siguientes supuestos [24]:

- El efecto del núcleo de hierro es mínimo, ya que las componentes de alta frecuencia, ante un transitorio de corriente, tienden propagarse por el conductor y no penetran a través del núcleo de hierro.
- Las inductancias mutuas pueden ser agrupadas en inductancias en serie.
- Se desprecian las pérdidas de energía debidas a descargas parciales.
- El período de estudio del transitorio es pequeño comparado con el permanente del proceso de polarización del aislamiento.

Tradicionalmente, los impulsos de baja tensión (“Low Voltage Impulse”, LVI) se han usado para detectar estos cambios y son también recomendados por los grupos de trabajo de IEEE para las pruebas de transformadores. En el artículo de Islam que nos ocupa, se utilizaron impulsos de baja tensión y barridos en frecuencia indistintamente, como se verá en cada caso, para obtener las funciones de transferencia e impedancias. La figura 3.14 muestra la representación de las magnitudes de una función de transferencia  $H(\omega) = V_{out}(\omega)/V_{in}(\omega)$ . Se aplicó un impulso a la entrada y se midió a la salida en el dominio del tiempo (ver figura 3.13). Después, se dividieron las transformadas de Fourier de ambas señales, para sacar  $H$ .  $H(\omega)$  fue obtenida de un análisis de barrido en frecuencia (no es fruto de impulsos, sino un barrido de señales sinusoidales) como resultado de una simulación en la que se hizo un cambio del 10% en las capacidades en serie ( $k/dx$ ) en varias localizaciones (las bobinas 4, 10 y 20, que son las que se representarán siempre gráficamente para apreciar los cambios en ellas) de un devanado de alta tensión de un transformador con 21 bobinas y 42 discos cuyos parámetros son  $L_l=13,65$  mH,  $C_{gl}=462$  pF,  $k/l=47,62$  pF,  $R_l=19\Omega$ ,  $G_l=1/R_g=210$  pmho [24]:

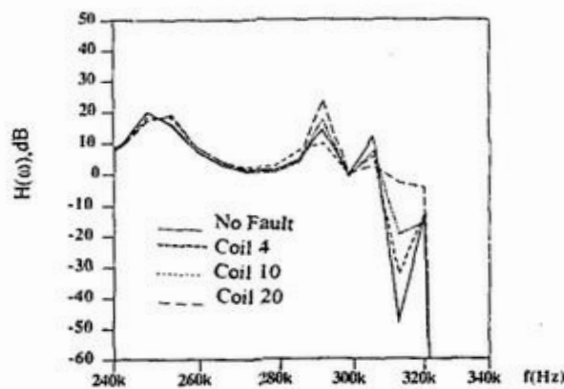


Figura 3. 14. Representación de  $H(\omega)$  después de un cambio del 10% en las capacidades en serie. [24]

Se grafican las bobinas 4, 10 y 20, por ejemplo, para compararlas con la respuesta “sana” (antes de simular el fallo, al que se llamará “No Fault” en todo el caso de aplicación). El cambio en  $H(\omega)$  es fácilmente visible: La magnitud de  $H(\omega)$  cambia unos 10 dB en la segunda frecuencia resonante pronunciada sobre los 287 kHz. Como la respuesta en bajas frecuencias está dominada por las inductancias, es lógico que la representación de la función de transferencia permanezca sin cambios en este rango. La figura 3.15 muestra la representación de  $H(\omega)$  cuando la conductancia en paralelo ( $Gdx$ ) en la bobina 7 se ha incrementado a 900



pmho, lo que simula un incremento de corriente de fuga en esa bobina. El cambio en la amortiguación de las resonancias de la función de transferencia es claramente visible [24].

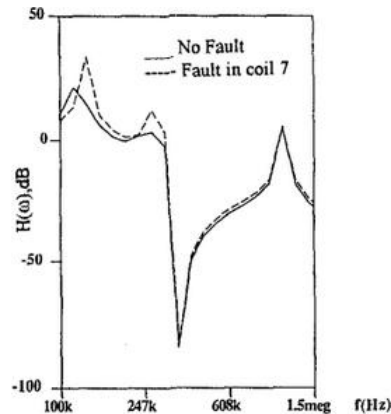


Figura 3. 15. Representación de la función de transferencia  $H(\omega)$  para una corriente de fuga elevada. [24]

La figura 3.16 muestra la impedancia en dB (es decir,  $V_i(\omega)/I_{\text{neutro}}(\omega)$ ) como resultado de una prueba de barrido para un cortocircuito del 10% del devanado. El cambio de la impedancia es claramente visible en la respuesta en frecuencia, ya que, por ejemplo se observa que, al reducirse la inductancia del devanado, la frecuencia de resonancia aumenta.

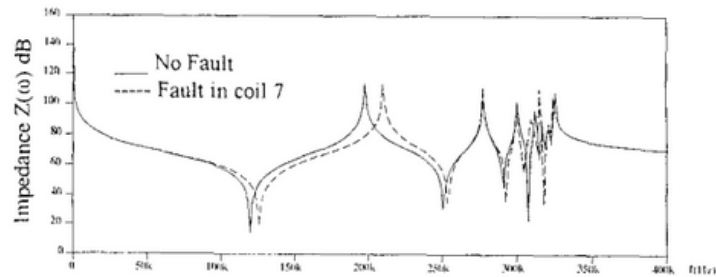


Figura 3. 16. Impedancia  $Z(\omega)$  para una falta en el devanado. [24]

Las observaciones hechas anteriormente son útiles y pueden ser utilizadas en localizar el fallo en el interior de un transformador. Los resultados del análisis de sensibilidad mostrados arriba indican claramente que los cambios que se han hecho a través de la simulación en los parámetros del transformador se reflejan en las representaciones de las funciones de transferencia. Estas simulaciones emulan una gran variedad de fallos en diferentes localizaciones a lo largo del devanado [24].

#### 3.4.2.1. PRUEBA 1: Cambio de la admitancia parásita en paralelo

Este caso fue estudiado para simular fallos debidos a un alto contenido de humedad en el devanado, daños en el aislamiento debidos a puntos calientes o movimiento excesivo de los

discos y abrasión. Cualquiera de los fallos anteriores puede cambiar la admitancia en paralelo parásita dentro del transformador. La figura 3.17 muestra la función de transferencia  $H(\omega)$  para un cambio relativamente grande en la admitancia en paralelo parásita a lo largo del devanado; se grafica el efecto de este cambio para las bobinas 4, 10 y 20 como en los casos anteriores. La simulación emula un test de barrido en el devanado hasta frecuencias de 10 MHz [24].

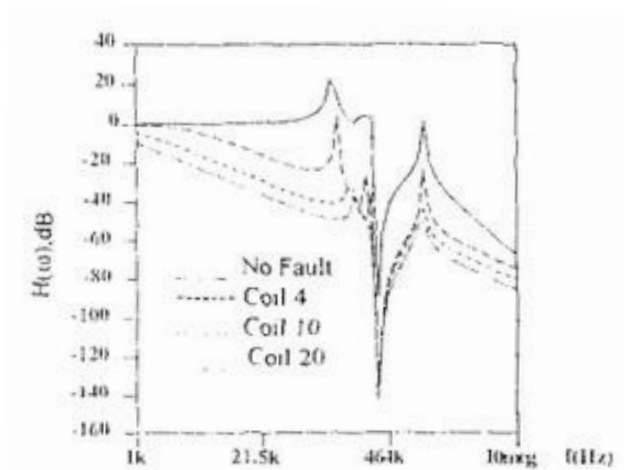


Figura 3. 17. Representación de  $H(\omega)$  para una falta severa de fuga a lo largo del devanado. [24]

Se ve claramente en la figura 3.17 que debido al fallo distribuido por el devanado, el polo resonante de media frecuencia de 202 kHz se desplazado unos pocos kHz debido al cambio en la combinación en paralelo de capacidades-inductancias en el modelo, así como que el amortiguamiento de las resonancias es notable por el cambio en la resistencia parásita. . El devanado fue también sometido a un impulso simulado tipo rayo estándar 1,2/50  $\mu$ s y la figura 3.18 muestra la función de transferencia  $H(\omega)$  para un fallo debido a fugas como el anterior. Además de la distorsión generada por la ventana rectangular para la transformada de Fourier (filtrado previo de las señales), el amortiguamiento del polo dominante en 200 kHz y alrededor de los 0,8 MHz es evidente [24].

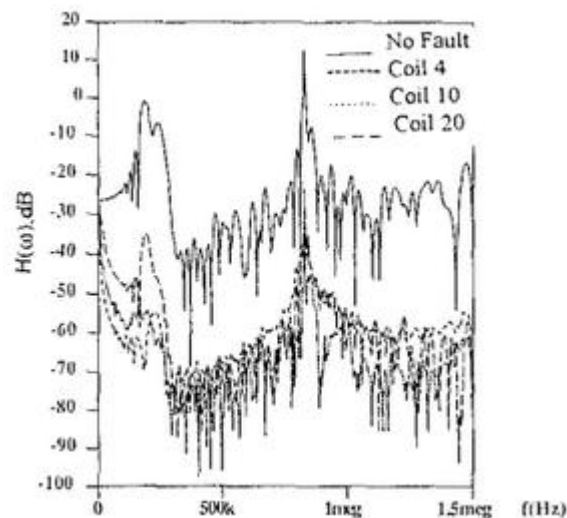


Figura 3. 18.  $H(\omega)$  de un test de impulso a lo largo del devanado. [24]

### 3.4.2.2. PRUEBA 2: Fallo interdiscal y entre espiras

Una de las mayores preocupaciones en los transformadores de potencia es que ocurra un fallo interdiscal o entre espiras. Para investigar el efecto de estos fallos se simuló un fallo de cortocircuito del 10% en varios puntos del devanado. Se llevaron a cabo tanto la prueba de respuesta medida mediante barrido como la de impulso estándar. La figura 3.19 muestra la magnitud de  $H(\omega)$  [24].

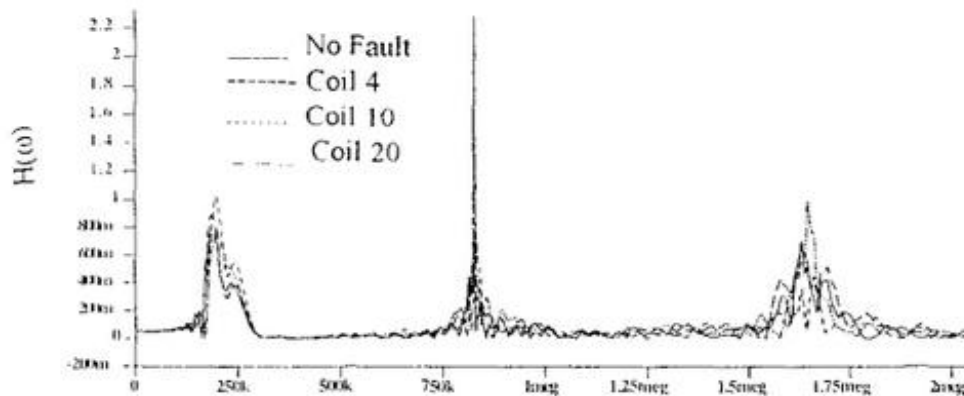


Figura 3. 19.  $H(\omega)$  para un cortocircuito del que se desliza a lo largo del devanado. [24]

La función de transferencia refleja claramente tres polos dominantes alrededor de los 200 kHz, 0,8 MHz y 1,6 MHz respectivamente. Solo el polo resonante de mayor frecuencia muestra cambios pronunciados (no solo cambia la magnitud del polo, también su propia frecuencia). Con el propósito de ver algunas características en baja frecuencia, la impedancia  $Z(\omega)$  ( $V_{\text{impulso}}(\omega)/I_{\text{neutro}}(\omega)$ , como se ha dicho antes) fue representada como se muestra en la figura 3.20; en ella se puede apreciar el fallo, que se simula en las distintas partes del devanado, y cómo la impedancia cambia  $30 \Omega$  en la frecuencia crítica de 200 kHz para este transformador [24].

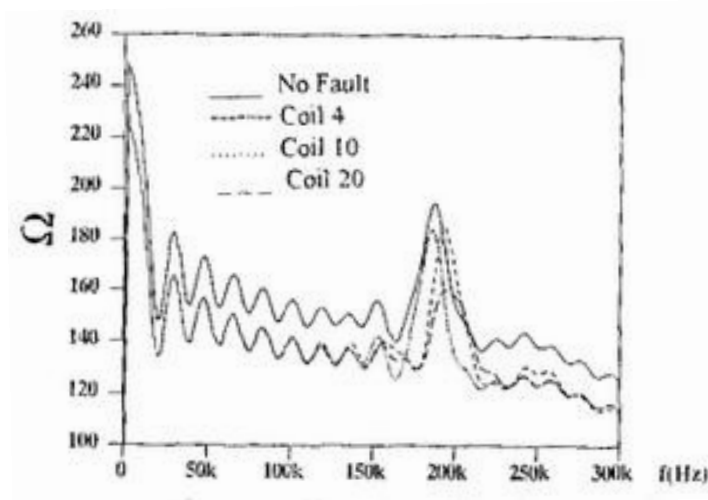


Figura 3. 20.  $Z(\omega)$  para una falta que se propaga por el devanado en un test de impulso. [24]

- Conclusiones

Los resultados muestran que es posible identificar la localización de la falta en un transformador basado en estas características. Los resultados pueden ser usados para identificar faltas en un transformador que no haya sido probado previamente. Este método contribuye a mejorar el papel cada vez más importante de la técnica del análisis de la función de transferencia como una herramienta de la monitorización de la condición importante para los transformadores de potencia [24].

### 3.4.3. Caso 3: ABU SIADA [25]

El estudio sobre el análisis de respuesta en frecuencia más reciente de estos tres presentados aquí lo hicieron en 2013 A. Abu Siada, N Hashemnia, S. Islam y Mohammad A. S Masoum en la universidad Curtin en Australia.

Para llevar a cabo sus análisis, utilizaron la conexión “end-to-end” (alimentación por fase y medida de respuesta en neutro) para el equipo del FRA, que es capaz de detectar los principales tipos de fallo mecánico y una de las que se han propuesto anteriormente en este capítulo:

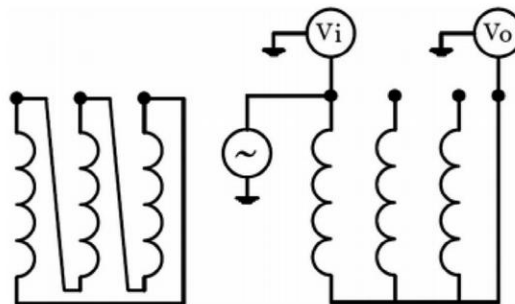


Figura 3. 21. Configuración “end-to-end” utilizada para llevar a cabo las pruebas del FRA. [25]

Los autores subdividen los rangos del FRA como se indica [25]:

- a) El rango de bajas frecuencias (<20 kHz), en el que los componentes inductivos dominan la respuesta del devanado del transformador.
- b) El rango de media frecuencia (20-400 kHz), en el que la combinación de componentes capacitivos e inductivos resulta en múltiples resonancias.
- c) El rango de altas frecuencias (>400 kHz), en el que los componentes capacitivos dominan la curva característica del FRA

Estos rangos y sus fallos asociados se muestran en la tabla 1 [25]:

Tabla 3. 5. Bandas del Análisis de Respuesta en Frecuencia y su sensibilidad al fallo. [25]

Banda de frecuencia	Sensibilidad al fallo
<20 kHz	Deformación del núcleo, circuitos abiertos, espiras en cortocircuito y magnetismo residual, movimiento del devanado, pérdida de sujeción de la estructura
20-40 kHz	Deformación en el devanado principal o derivaciones
>400 kHz	Movimiento del devanado principal y derivados, variación de la impedancia a tierra

### 3.4.3.1. Modelo de transformador y análisis de sensibilidad

Los devanados de alta y baja tensión se supusieron cada uno de 10 discos. Cada uno de los discos comprendía una resistencia ( $R_s$ ) y una inductancia ( $L_s$ ) en serie, en paralelo con un condensador ( $C_{sh}$ ) y una conductancia ( $G_{sh}$ ). La capacidad ( $C_{HL}$ ) entre el devanado de alta y baja tensión en paralelo con una conductancia dieléctrica ( $G_{HL}$ ), y las inductancias mutuas ( $M_{ij}$ ) entre las bobinas  $i$  y  $j$  se incluyeron. El aislamiento dieléctrico (aceite) entre el devanado de baja y el núcleo, y entre el devanado de alta tensión y la cuba, se simuló por una capacidad ( $C_g$ ) y una conductancia dieléctrica ( $G$ ). Los valores de los componentes libres de fallo del modelo dado en se enumeran en el apéndice, justo al final de este capítulo.

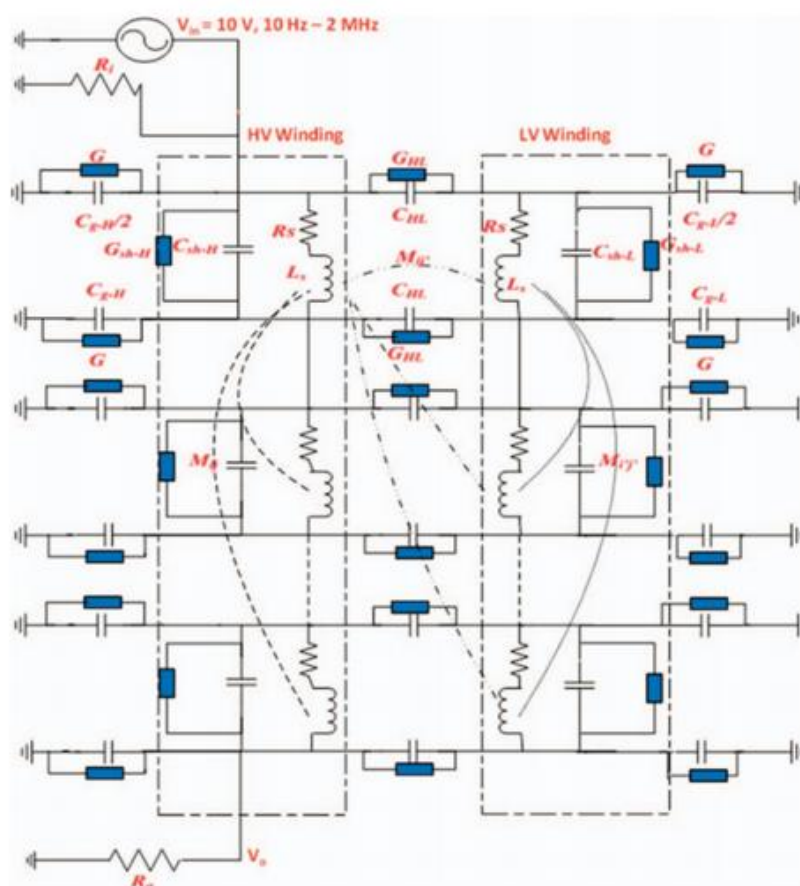


Figura 3. 22. Modelo de transformador de 10 discos. . [25]

En la tabla 2 están enumerados los parámetros del modelo del transformador y las faltas mecánicas que los influyen.

Tabla 3. 6. Parámetros del modelo y los fallos mecánicos que los afectan. [25]

Parámetro del modelo	Tipo de fallo
Inductancia, $L_s$	Deformación de discos, ruptura local, deformación del núcleo y cortocircuitos en el devanado
Capacidad en paralelo, $C_{sh}$	Movimiento de discos, pandeo debido a fuerzas mecánicas grandes, entrada de humedad y pérdida de la presión de sujeción
Capacidad en serie, $C_{HL}$	Envejecimiento del aislamiento, entrada de humedad y movimiento de discos
Resistencia, $R_s$	Discos en cortocircuito o rotos, desgaste de los contactos de los cambiadores de tomas

En una simulación, se conectó una tensión de excitación sinusoidal ( $V_{in}$ ) de 10 V y frecuencia variable (10 Hz a 2 MHz) a un terminal del devanado, y la respuesta se grabó en el otro terminal ( $V_o$ ). Estos cables coaxiales se representan con unas resistencias de  $50 \Omega$  ( $R_i$  y  $R_o$  en la figura 3.31). La función de transferencia  $TF_{dB} = 20 \log_{10} (V_o/V_{in})$  se representa junto con la frecuencia. La figura 3. 23 muestra el efecto causado por la variación de un  $\pm 10\%$  en las capacidades  $C_g$  y  $C_{sh}$  del devanado de alta tensión. Aumentando  $C_{sh}$ , vemos que decrecen las frecuencias resonantes y anti resonantes. Disminuyendo  $C_{sh}$ , aumentan las frecuencias resonantes y anti resonantes. Las mismas tendencias las observamos para las variaciones de  $C_g$  se hace más pronunciado para frecuencias mayores de 400 kHz.

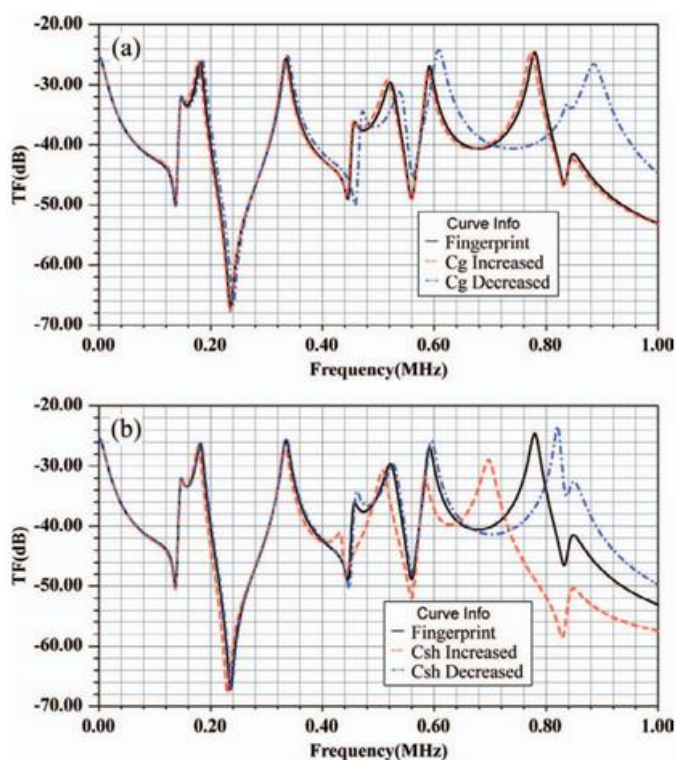


Figura 3. 23. Efecto de cambios del 10% en la capacidad del devanado de alta tensión sobre la “firma” del FRA con relación a la curva inicial (a)  $C_g$  y (b)  $C_{sh}$ . .TF=Transfer Function [25]

La figura 3.24 muestra el efecto de la variación de un  $\pm 10\%$  sobre las autoinductancias ( $L_s$ ) y las inductancias mutuas ( $M_{ij}$ ). El efecto de la variación sobre  $L_s$  y  $M_{ij}$  comenzaba por debajo de los 200 kHz y se hacía más pronunciado cuando se acerca a 1 MHz. La cantidad de flujo magnético entrando al núcleo del transformador en frecuencias bajas es significativo, por lo que las características del núcleo afectan a la curva característica del FRA en bajas frecuencias. Para frecuencias altas, el flujo magnético tiende a quedar muy concentrado en pequeños espesores del núcleo (efecto pelicular magnético) y los componentes capacitivos del transformador dominan la respuesta. Aumentando  $L_s$ , disminuían las frecuencias resonantes y anti resonantes con pequeños cambios en sus magnitudes; disminuyendo  $L_s$ , aumentaron. La tendencia opuesta se observó cuando se cambiaron las inductancias mutuas  $M_{ij}$ , es decir, aumentando  $M_{ij}$  aumentaban las frecuencias resonantes y anti resonantes y disminuyéndola disminuyeron (en bajas frecuencias, en las altas se distorsiona tanto que no se puede hacer esta comparación).

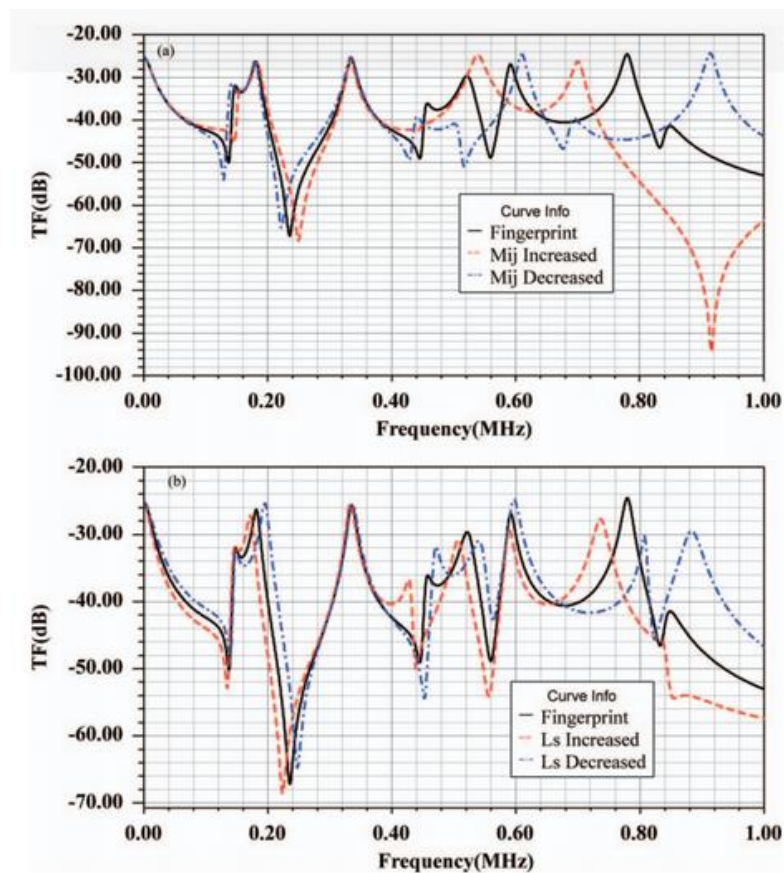


Figura 3. 24. Efecto de cambios del  $\pm 10\%$  en las autoinductancias (b) e inductancias mutuas (a) del devanado de alta tensión sobre la característica del FRA, relativos a la curva inicial. [25]

La figura 3.25 muestra el efecto de aumentar la conductancia ( $G$ ) del devanado de alta tensión un 10% en la curva característica del FRA. No tuvo efectos sobre las frecuencias resonantes y anti resonantes. Si que sí provocó, sin embargo, es un pequeño cambio sobre las magnitudes máximas en altas frecuencias. Esto se atribuye al alto valor de la resistencia usada en la simulación (7 M $\Omega$ ), que es el típico para el aceite de un transformador.



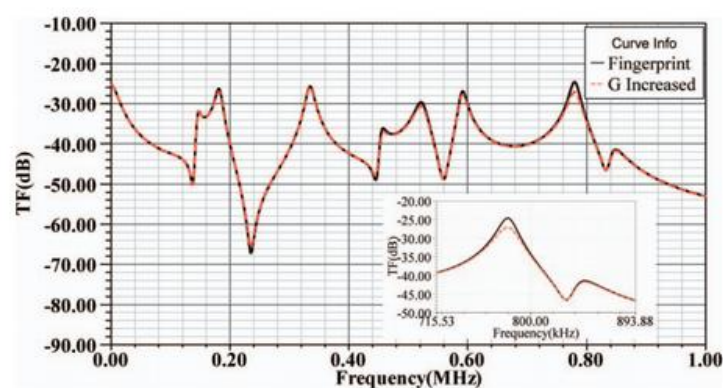


Figura 3. 25. Efecto del incremento de la conductancia G del devanado de alta tensión en la “firma” del FRA. . [25]

Los efectos que tuvieron las variaciones de un  $\pm 10\%$  de los diversos parámetros eléctricos en las frecuencias resonantes y valores del FRA están resumidos en la tabla 3 [25]:

Tabla 3. 7. Efectos de la variación del  $\pm 10\%$  de varios parámetros eléctricos en las frecuencias resonantes y magnitudes del FRA (Relativos a la curva referencia).[25]

Variación del parámetro	Rango de frecuencia		
	Baja(<20 kHz)	Media (20-400 kHz)	Alta (>400 kHz)
$L_s$			
<b>Incremento 10%</b>	Disminuyen las magnitudes y las frecuencias resonantes	Disminuyen las magnitudes y las frecuencias resonantes	Disminuyen las magnitudes y las frecuencias resonantes
<b>Disminución 10%</b>	Aumentan las magnitudes y las frecuencias resonantes	Aumentan las magnitudes y las frecuencias resonantes	Aumentan las magnitudes y las frecuencias resonantes
$C_{sh}$			
<b>Incremento 10%</b>	No hay efecto	No hay efecto	Disminuyen las magnitudes y las frecuencias resonantes
<b>Disminución 10%</b>	No hay efecto	No hay efecto	Aumentan las magnitudes y las frecuencias resonantes
$C_g$			
<b>Incremento 10%</b>	No hay efecto	No hay efecto	Disminuyen ligeramente las magnitudes y las frecuencias resonantes
<b>Disminución 10%</b>	No hay efecto	No hay efecto	Aumentan ligeramente las magnitudes y las frecuencias resonantes



$M_{ij}$			
<b>Incremento 10%</b>	Aumentan las frecuencias resonantes	Aumentan las frecuencias resonantes	Demasiada distorsión
<b>Disminución 10%</b>	Disminuyen las frecuencias resonantes	Disminuyen las frecuencias resonantes	Demasiada distorsión
<b>G</b>			
<b>Incremento 10%</b>	No hay efecto	No hay efecto	Disminuyen las magnitudes

### 3.4.3.2. Análisis de fallo

Para simular los fallos físicos dentro del transformador, se usó el Software Simplorer y Maxwell para simular un modelo de una sola fase, de un devanado de disco, de elementos finitos en 3D como se muestra en la figura 3.26.

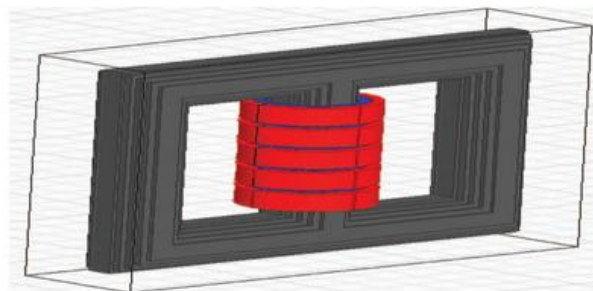


Figura 3. 26. Modelo de transformador en 3D. . [25]

#### 1) Pérdida de la presión de sujeción:

La pérdida de presión de sujeción es un problema común, particularmente en los transformadores envejecidos. Es causado por histéresis mecánica en el cartón prensado y en el aislamiento de papel y lleva a un aumento de la conductividad del aislamiento debido a la pérdida de espesor del aislamiento entre las capas del devanado. Puede ser simulado mediante un aumento del valor de la conductancia en paralelo  $G_{sh}$ . Las figuras 3.27 y 3.28 muestran el efecto de un aumento del 20% en  $G_{sh}$  en las curvas del FRA de los devanados de alta y baja tensión, respectivamente; las frecuencias resonantes y anti resonantes no se vieron desplazadas, pero los valores de los picos de resonancia si se vieron reducidos durante todo el rango de frecuencias.

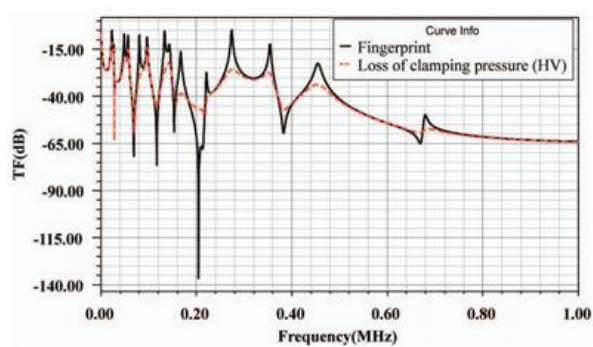


Figura 3. 27. Efecto de una pérdida de presión de sujeción simulada en el devanado de alta tensión sobre la “firma” del FRA . [25]

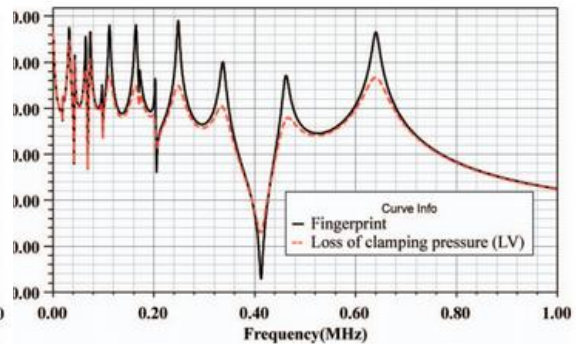


Figura 3. 28. Efecto de una pérdida de presión de sujeción simulada en el devanado de baja tensión sobre la “firma” del FRA. . [25]

## 2) Fallo interdiscal:

El fallo interdiscal es uno de los fallos mecánicos más comunes entre los transformadores de potencia, ya que aproximadamente un 80% de los fallos mecánicos pueden atribuirse a él. Se debe a cambios en el espacio axial entre los discos (figura 3.29) causados por el exceso de estrés mecánico y por faltas de cortocircuito, y puede ser simulado a través del incremento de la capacidad en serie ( $C_{sh}$ ) y de la inductancia mutua ( $M_{ij}$ ) entre los dos discos considerados.

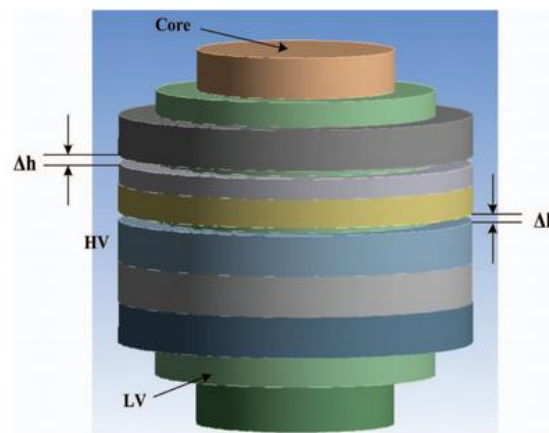


Figura 3. 29. Configuración del fallo interdiscal ( $\Delta h$ ). . [25]

La figura 3.30 muestra la simulación que se hizo del efecto de un incremento del 10% de  $C_{sh}$  y de  $M_{ij}$  en la “firma” del FRA del devanado de alta tensión cuando la falta ocurre en la parte alta, media y baja del devanado. El incremento del 10% de  $C_{sh}$  y  $M_{ij}$  correspondió a un incremento del 10% en el espacio entre discos ( $\Delta h$ ). Este fallo se comprobó que no tenía relevancia significativa en la característica del FRA en frecuencias menores de 300 kHz. Las frecuencias resonantes y anti resonantes por encima de los 300 kHz decrecieron, y los valores de los máximos cambiaron. La bajada de frecuencia es mayor cuando el fallo ocurre en los discos de la parte alta o baja del devanado, más que en los discos del sector central [25].

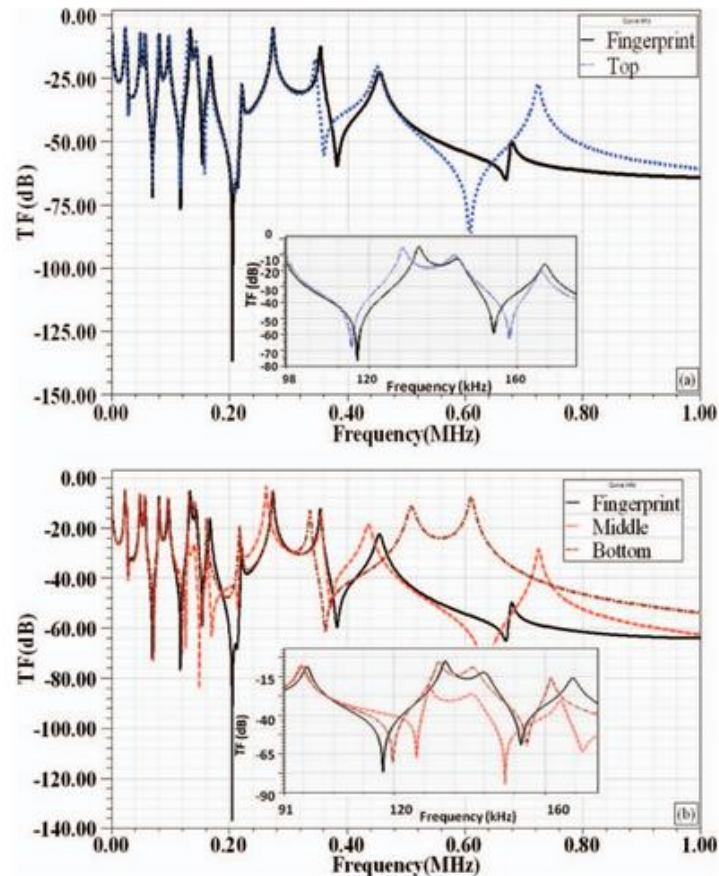


Figura 3. 30. Efecto de un fallo interdiscal en la “firma” del FRA en el devanado de alta tensión. . [25]

### 3) Fallo en el pasatapas del devanado de alta tensión:

Se simuló mediante la conexión de un modelo de circuito en forma de T (representando al pasatapas) mostrado en la figura 3.31 entre la fuente de tensión  $V_{in}$  y el modelo de transformador de la figura 3.22. El efecto de la reducción en un 10% en la capacidad del buje (de 200 pF como se muestra en la figura 3.31 a 180 pF; asociado a una reducción de rigidez dieléctrica) en la curva característica del FRA se muestra en la figura 3.32. Como se muestra en la figura, no se observó un cambio significativo en la curva característica por debajo de los 600 kHz, pero las frecuencias resonantes y anti resonantes sobre los 700 kHz desaparecieron [25].

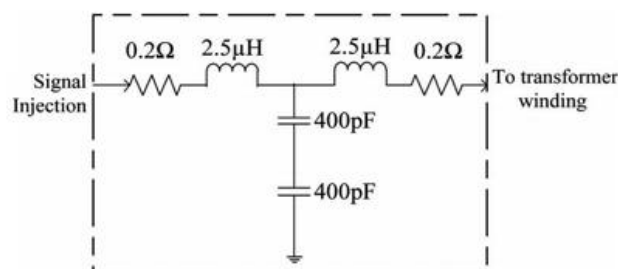


Figura 3. 31. Modelo del pasatapas del transformador. [25]

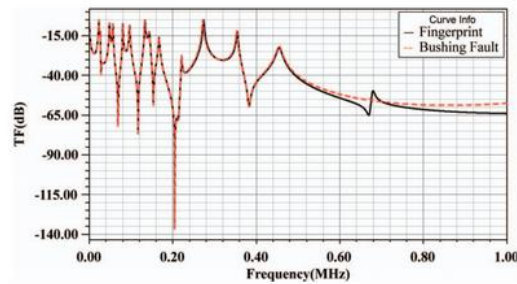


Figura 3. 32. Efecto de un fallo en el pasatapas en la curva característica del FRA del devanado de alta tensión. . [25]

#### 4) Fallo de desplazamiento axial:

Este fallo ocurre debido al desequilibrio de las fuerzas magnéticas generadas en un devanado como resultado de un fallo de cortocircuito. Estas fuerzas provocan un movimiento axial en el devanado como se muestra en la figura 3.33.

El fallo fue simulado cambiando los valores de la capacidad en serie ( $C_{sh}$ ) y de la inductancia mutua ( $M_{ij}$ ) entre los devanados de alta y baja tensión. Un incremento del 10% en  $C_{HL}$  y en  $M_{ij}$  corresponde a un desplazamiento axial  $\Delta h$  aproximadamente igual al 10% del total de la longitud del devanado.

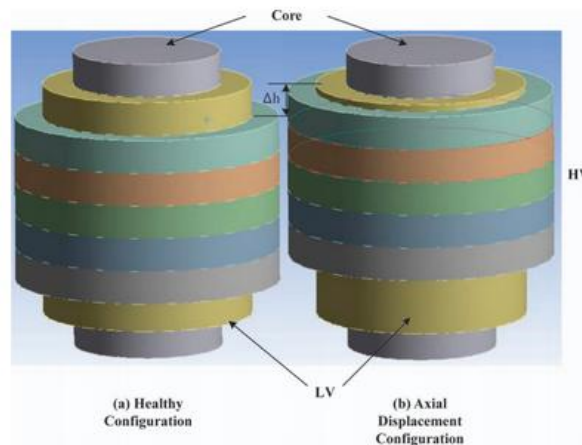


Figura 3. 33. Configuración de desplazamiento axial. [25]

La figura 3.34 muestra que esta falta tuvo un efecto mínimo en la curva característica del FRA en frecuencias por debajo de los 200 kHz. En el intervalo entre 200 y 400 kHz las frecuencias resonantes y sus valores disminuyeron. La resonancia alrededor de los 700 kHz en la gráfica inicial se vio desplazada hacia frecuencias mayores y sus valores aumentan. Estas tendencias son independientes de la dirección del movimiento axial [25].

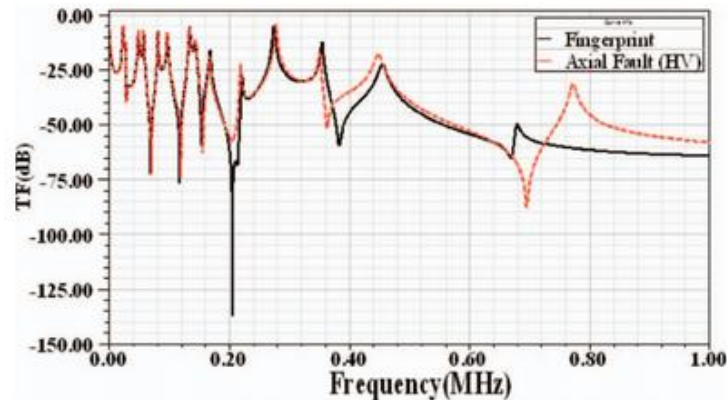


Figura 3. 34. Efecto del desplazamiento axial del devanado de alta tensión en la "firma" del análisis de respuesta en frecuencia. [25]

#### 5) Fallo de corriente de fuga dieléctrica

Un daño localizado en el aislamiento a tierra, el envejecimiento del papel y del aceite, el alto contenido de humedad en el devanado y la erosión del aislamiento sólido son las principales causas de la corriente de fuga a tierra a través del aislamiento del transformador. Este tipo de fallo se puede simular aumentando la conductancia entre el devanado de alta tensión y la tierra (G en la figura 3.22). La figura 3.35 muestra que este fallo produjo pequeños cambios en las magnitudes máximas del FRA por debajo de los 200 kHz [25].

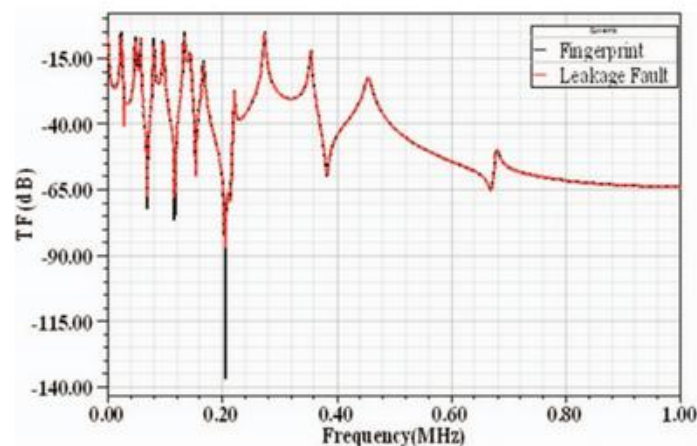


Figura 3. 35. Efecto de un fallo en la corriente de fuga dieléctrica en la "firma" del FRA. [25]

#### 6) Fallo de cortocircuito

Es debido a la erosión del devanado y el aislamiento del conductor debido a vibraciones generadas por fuerzas electromecánicas. La erosión puede llevar a una corriente excesiva por el devanado. El fallo se representó a través del cortocircuito de la resistencia en serie,  $R_s$ , y la



inductancia en serie,  $L_s$ , del devanado de alta tensión (figura 3.22). La figura 3.36 muestra que este fallo tuvo un efecto pequeño en la curva característica en frecuencias por debajo de los 200 kHz. En frecuencias más altas las magnitudes se vieron ligeramente incrementadas y las frecuencias resonantes bajaron un poco. El mismo fallo tiene un efecto mayor cuando ocurre en la parte alta o baja del devanado, que en la parte central [25].

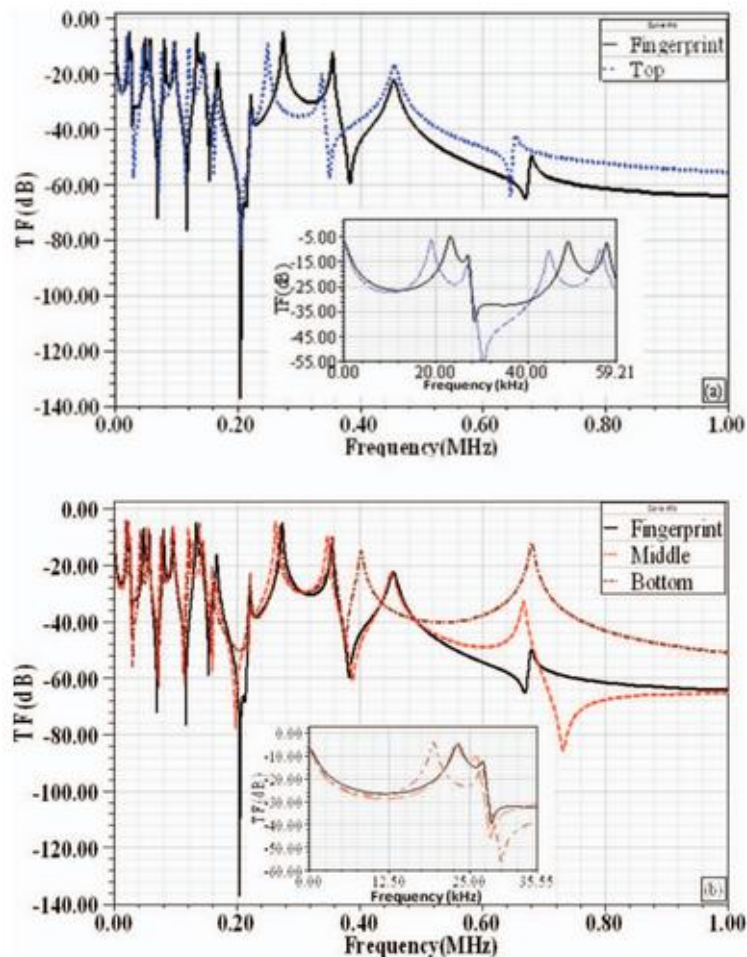


Figura 3. 36. Impacto de un fallo de cortocircuito en el devanado de alta tensión sobre la “firma” del FRA cuando ocurre (a) en la parte superior del devanado o (b) en la parte central e inferior. [25]

#### 7) Fallo de desplazamiento radial:

Los devanados pueden estar sometidos a fuerzas radiales provenientes de la interacción de la corriente del devanado con el flujo magnético, que pueden llevar al pandeo del devanado. La figura 3.37 muestra una dislocación entre los devanados de baja y alta tensión. Este fallo fue simulado mediante la disminución de la capacidad a tierra ( $C_g$ ), la de la capacidad entre los devanados de alta y baja tensión ( $C_{HL}$ ) y de la inductancia mutua ( $M_{ij}$ ) de los discos afectados. Una bajada simultanea de un 10% de cada uno de los valores de estos tres parámetros corresponde con un desplazamiento radial  $\Delta w$  de los discos afectados aproximadamente igual al 10% del diámetro de los discos, como se muestra en la figura 3.37.

La respuesta del FRA de los devanados de alta y baja tensión se representa en las figuras 3.38a y 3.38b respectivamente. La figura 3.38a muestra cómo las frecuencias resonantes del devanado de alta tensión se vieron incrementadas ligeramente en frecuencias por encima de los 400 kHz. En el devanado de baja tensión, el incremento tuvo lugar en frecuencias mayores de 20 kHz [25].

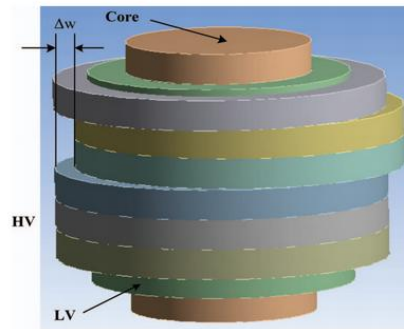


Figura 3.37. Configuración del fallo radial. . [25]

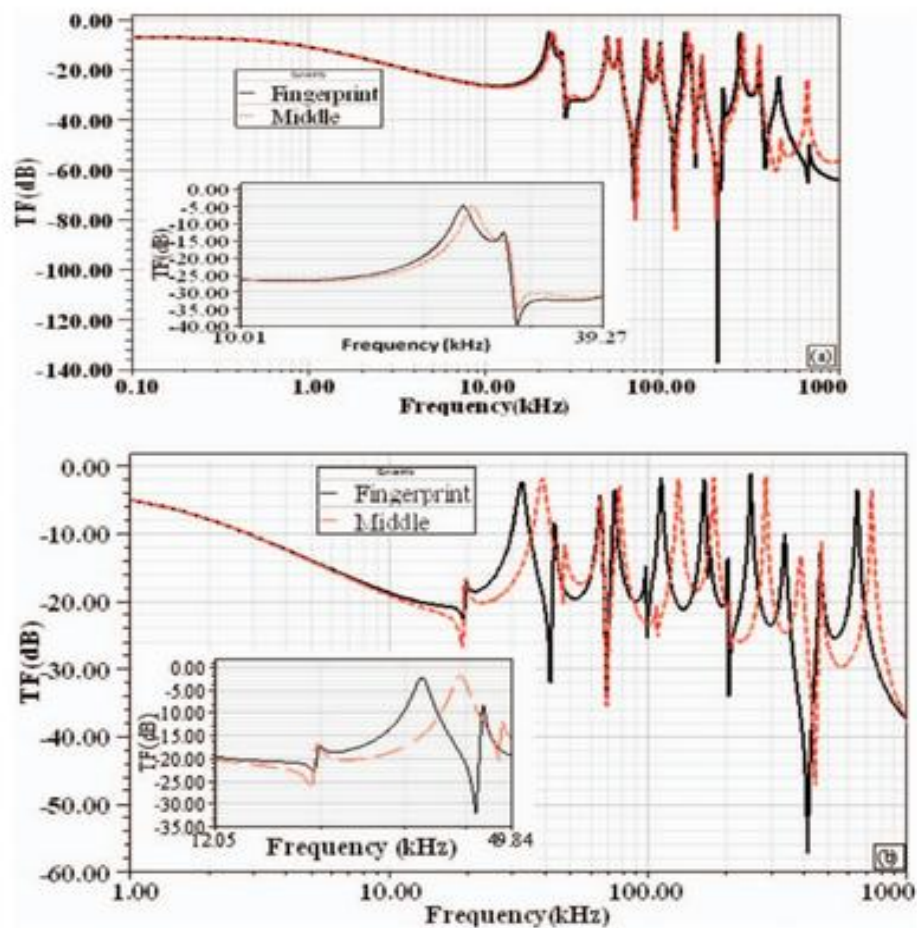


Figura 3. 27. Efecto de un fallo de desplazamiento radial en la “firma” del FRA en el devanado de (a) alta tensión y (b) baja tensión. [25]

La tabla 4 resume diferentes tipos de fallo y sus efectos sobre la curva característica del FRA. Puede ser usada en la formulación de códigos estándar para la interpretación de la curva característica del FRA de transformadores de potencia [25].

**Tabla 3. 8. Efectos de diversos fallos sobre la curva característica del FRA de un transformador. [25]**

Tipo de fallo	Rango de frecuencias		
	<20 kHz	20-400 kHz	>400 kHz
<b>Desplazamiento axial</b>	No hay efecto	Disminuyen las magnitudes y las frecuencias resonantes	Aumentan las magnitudes y las frecuencias resonantes
<b>Desplazamiento radial</b>	Aumentan las frecuencias resonantes	Aumentan las frecuencias resonantes	Aumentan las frecuencias resonantes
<b>Cojinete de alta tensión</b>	No hay efecto	No hay efecto	No hay efecto
<b>Corriente de fuga dieléctrica</b>	Disminuyen ligeramente las magnitudes	Disminuyen ligeramente las magnitudes	No hay efecto
<b>Fallo Interdiscal</b>	No hay efecto significativo	Disminuyen las magnitudes y las frecuencias resonantes	Disminuyen las magnitudes y las frecuencias resonantes
<b>Cortocircuito</b>	No hay efecto significativo	Aumentan las magnitudes y disminuyen las frecuencias resonantes	Aumentan las magnitudes y disminuyen las frecuencias resonantes
<b>Perdida de la presión de sujeción</b>	Disminuyen las magnitudes	Disminuyen las magnitudes	Disminuyen las magnitudes

## Apéndice

**Tabla 3. 9. Valores de los componentes del modelo de transformador. [25]**

	$R_s$	$L_s$	$C_{sh}$	$C_g$	$C_{hl}$	$1/G$
<b>Devanado de alta tensión</b>	1,2 $\Omega$	180 $\mu H$	0,013 nF	3 nF	5 nF	7 $\Omega$
<b>Devanado de baja tensión</b>	0,5 $\Omega$	65 $\mu H$	0,026 nF	6 nF	5 nF	7 $\Omega$



## Capítulo 4: Medidas en transformadores.

### 4.1.- Procedimiento experimental.

En este capítulo se lleva a cabo la parte experimental del Trabajo de Fin de Grado. En él, se representarán las funciones de transferencia y las impedancias de dos transformadores elegidos al azar en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Superior. Para ello, se utilizarán barridos de frecuencia generados por un analizador de respuesta en frecuencia, perteneciente a la Universidad. Después se compararán las respuestas en frecuencia entre ellas para encontrar diferencias y similitudes y poder sacar conclusiones, es decir, aplicar la técnica al diagnóstico del estado de transformadores trifásicos tal y como se vio en el capítulo 3. Hay que destacar que el análisis de respuesta en frecuencia (FRA) no suele aplicarse a transformadores de baja tensión y poca potencia como estos, pero se emplearán para dar aplicación de los conocimientos adquiridos a máquina reales. Las destrezas adquiridas para estos transformadores serían igualmente válidas para otros, aunque las conclusiones adquiridas cambiarían (más probabilidad de existencia de fallos en transformadores en servicio continuo), evidentemente.

Para cuantificar las diferencias que se han visto en las gráficas se han utilizado dos parámetros estadísticos, que son el factor de correlación cruzada o coeficiente de correlación, que mide el grado de relación entre dos variables (siendo 1 la igualdad completa) y la desviación típica, que mide la dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Estos dos parámetros estadísticos están definidos en el Capítulo 3, con los números de fórmula (3.28) y (3.29) respectivamente. Tanto para las gráficas como para los parámetros se ha utilizado un Script de Matlab que mostraba los resultados (el código se incluye en el anexo A). A continuación pasa a explicarse todo el proceso experimental y a comentar los resultados obtenidos para cada una de las simulaciones.

#### 4.1.1.- Características comunes a todas las medidas

Para las medidas se utilizó un analizador de respuesta en frecuencia capaz de realizar barridos en los intervalos de interés Solartron (1260 Impedance/Gain-Phase Analyzer). Este aparato, instalado en el laboratorio, se muestra en la siguiente fotografía:



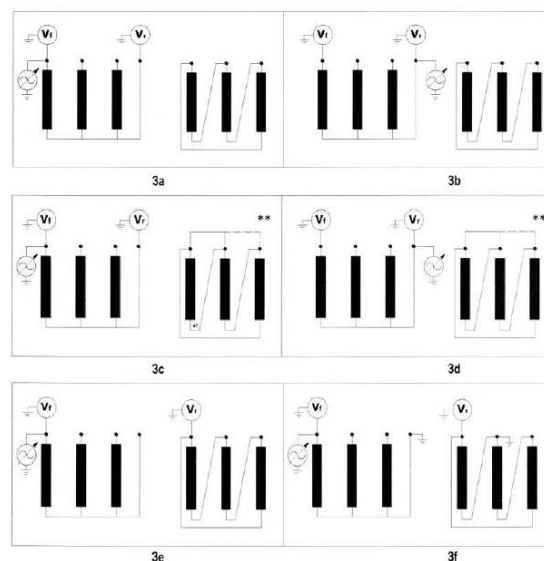
**Figura 4. 1. Analizador de respuesta en frecuencia. Solartron. [Elaboración propia].**

Se seleccionaron dos transformadores al azar para ser analizados, pertenecientes al laboratorio de máquinas eléctricas, situados en los puestos 1 y 2 de dicho laboratorio. Ambos transformadores tienen una relación de transformación 220/127 V.

El simulador de barridos cuenta con un Software para facilitar las acciones. Se simuló un barrido de frecuencias en un rango desde 30 Hz (para que abarcara también la frecuencia de uso industrial) a 3 MHz, según lo propuesto en la bibliografía. [22]. Se representaron 20 puntos por década.

#### **4.1.2.- Conexionado para medida de funciones de transferencia.**

Para obtener las funciones de transferencia, se realizaron barridos en frecuencia con las configuraciones siguiendo las formas de conexión propuestas por Leonardo Melo [22], y secundadas por otros autores, como se mostró en el Capítulo 3, siempre manteniendo el primario en estrella y el secundario en triángulo. Estas conexiones se muestran en la figura 3.8 del capítulo 3 y se recuerdan aquí de nuevo, aunque se irán detallando en cada sección del capítulo:

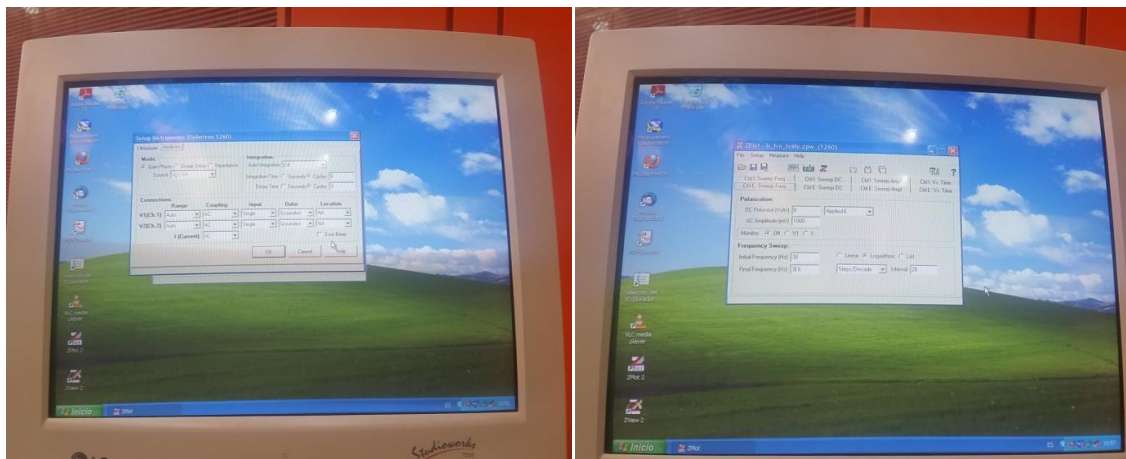


**Figura 4. 2. Conexiones. [22]**



**Figura 4. 3. Conexión del primario en triángulo y secundario en estrella. Común para todas las configuraciones de funciones de transferencia. [Elaboración propia]**

La tensión inyectada fue de 1 V (1000 mV como se aprecia en la fotografía):



**Figura 4. 4. Software de Solartron. [Elaboración propia]**

Se conectó el transformador al simulador de la manera que se indica a continuación, siguiendo el esquema del manual de uso del Solartron Analytical [26]. Dos coaxiales se conectan a la entrada de sistema (alimentación y medida) y uno a la salida (medida):

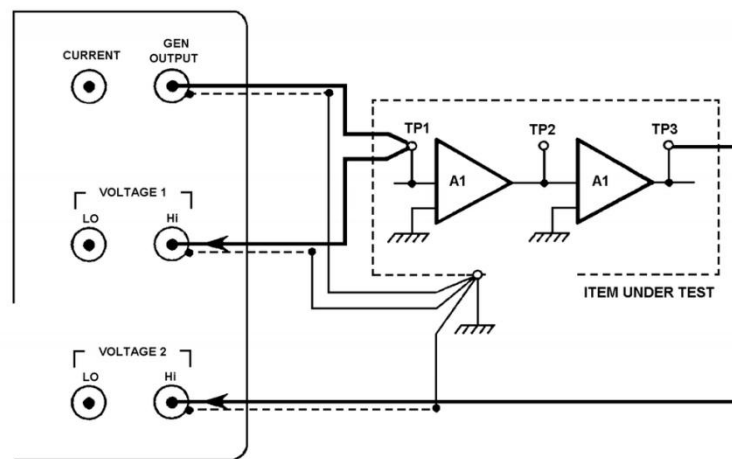


Figura 4. 5. Conexiones para medir funciones de transferencia. [26]

Este esquema de conexión se muestra en la fotografía siguiente:



Figura 4. 6. Conexiones para medir función de transferencia. [Elaboración propia]

Una vez hechas y comprobadas las conexiones del transformador tanto con el Simulador de barridos como sus propios devanados, se pasó a ir haciendo las mediciones en todas las configuraciones una a una.



#### 4.1.3.- Conexión para medida de impedancias.

Se midió también la impedancia de cada fase de cada devanado. Se cambiaron las conexiones siguiendo el esquema que se muestra a continuación, obtenido del manual de uso de Solartron [26] y se cambió también el Setup del Analizador que se estaba usando al propio para impedancias:

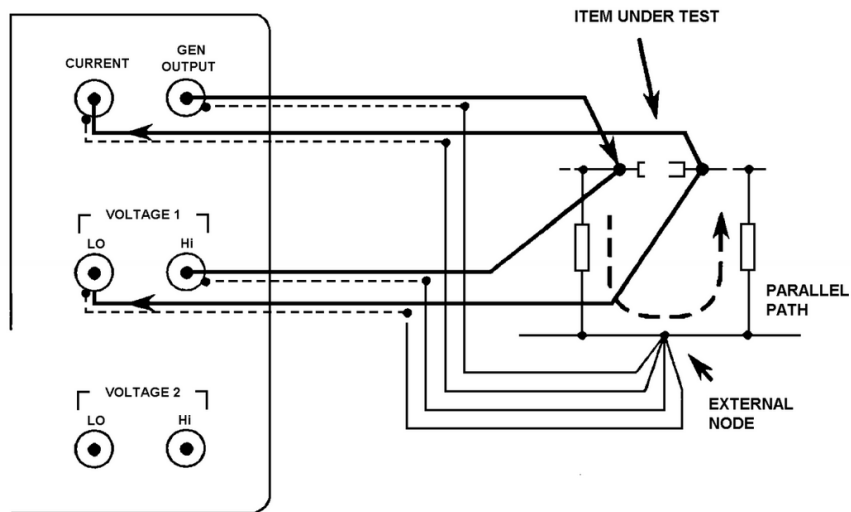


Figura 4. 7. Configuración para medir impedancias. [26]

El cableado que se hizo en el laboratorio puede verse en las fotografías:

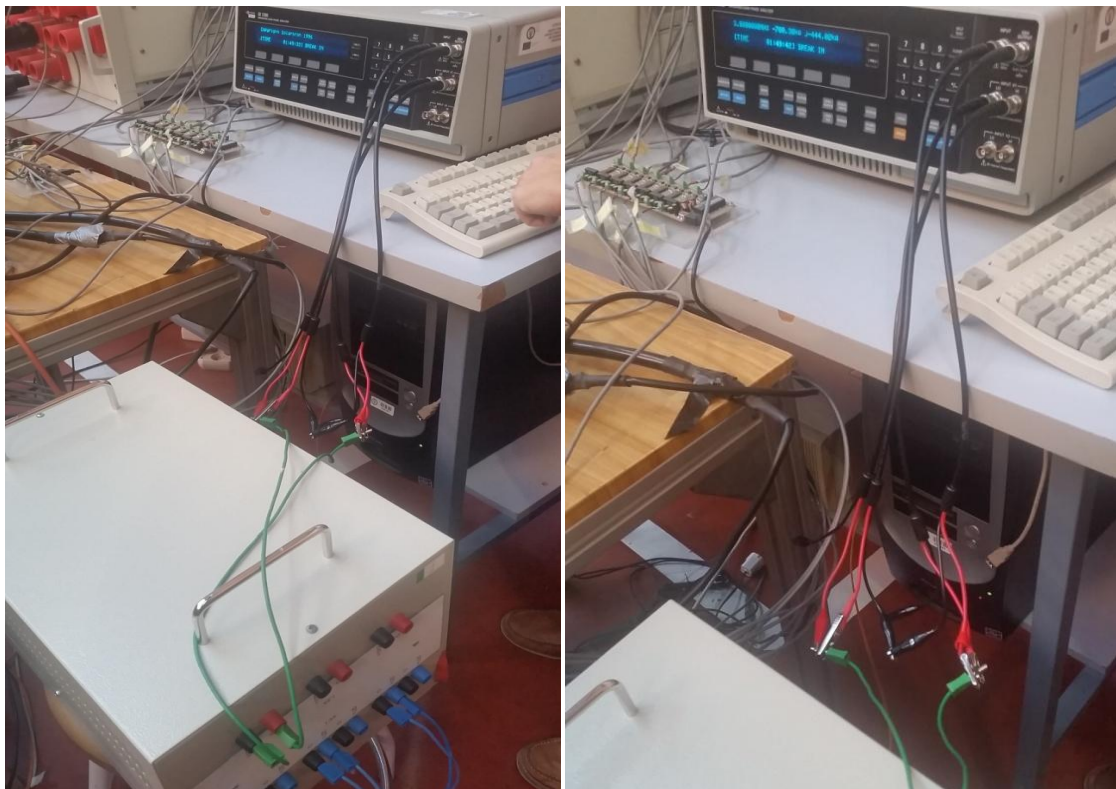


Figura 4. 8. Cableado para medir impedancias. [Elaboración propia]

Las impedancias se midieron una a una, como se muestra en las imágenes (en la primera fotografía se está midiendo la impedancia de la fase U del devanado primario)

## 4.2.-Medidas en Transformador 1

### 4.2.1.- Función de transferencia

#### 4.2.1.1.- Configuración 1

La alimentación se hizo por el primario y se midió la salida también en el primario (siempre por el neutro, en este caso), cambiando las fases de alimentación. El secundario se deja en vacío:

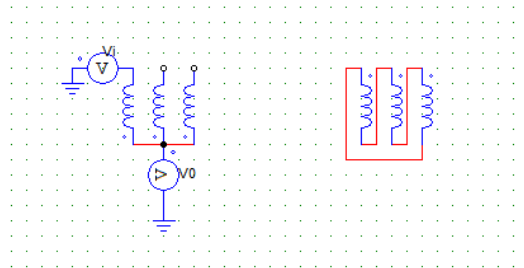


Figura 4. 9. Configuración 1 para medida de función de transferencia de fase U en primario con secundario en vacío. [Elaboración propia]

Estos tres barridos de frecuencia generaron tres ficheros, que se llamaron:

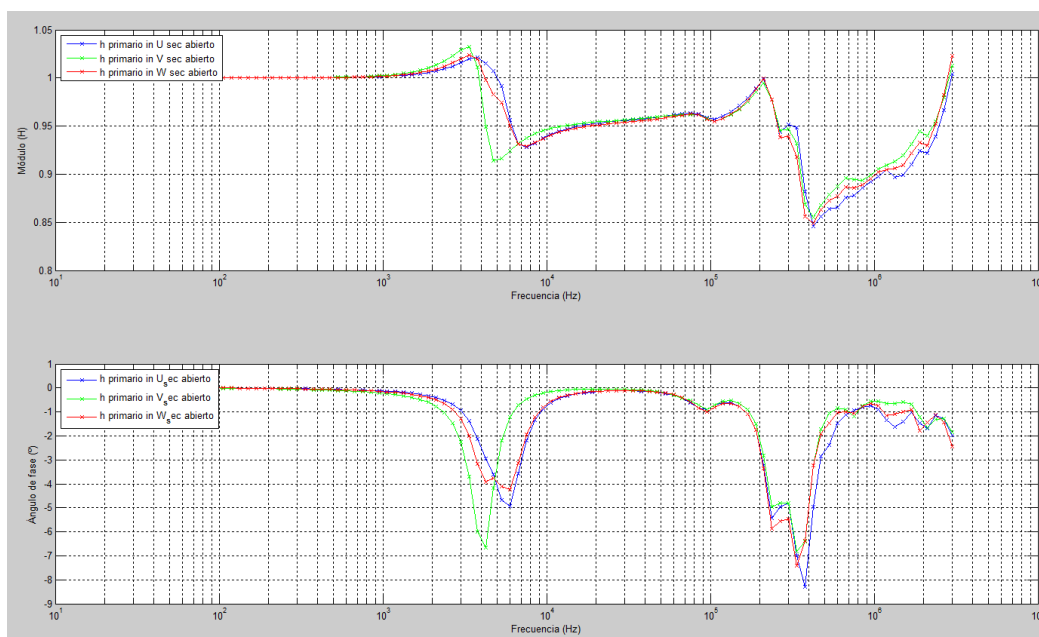
- h\_prim\_inU\_secabto
- h\_prim\_inV\_secabto
- h\_prim\_inW\_secabto

A continuación se muestran las configuraciones cambiando las salidas, para las fases V y W:



Figura 4. 10. Configuración para medir función de transferencia en fases V y W con secundario en abierto. [Elaboración propia]

Al procesar en Matlab los ficheros, el código grafica cada una de las funciones de transferencia (módulo y ángulo), las tres juntas para apreciar los cambios entre ellas y también muestra la desviación típica y factor de correlación cruzada entre ellas dos a dos, con el fin de, no solo poder ver la diferencia, sino también cuantificarla. El código de Matlab utilizado puede verse en el Anexo A. En la siguiente figura se representan las tres funciones de transferencia resultantes de cambiar la entrada de la fase U, a la V y a la W manteniendo el secundario en circuito abierto:



**Figura 4. 11. Funciones de transferencia para entrada por U, V y W con secundario abierto. [Elaboración propia]**

En las respuestas en frecuencia se pueden apreciar tres crecimientos con la frecuencia superpuestos con dos reducciones (alrededor de 5kHz y 400kHz) asociadas a los cambios en comportamientos inductivo-capacitivos del devanado. Esto se puede ver claramente en la representación de las impedancias que posteriormente se presentará. Las gráficas obtenidas tienen el mismo aspecto que las que se representaron de la bibliografía en la explicación de la teoría del FRA (logarítmicas) [22].

**Tabla 4. 1. DT y CC para funciones de transferencia con entrada en U, V y W y secundario abierto. [Elaboración propia]**

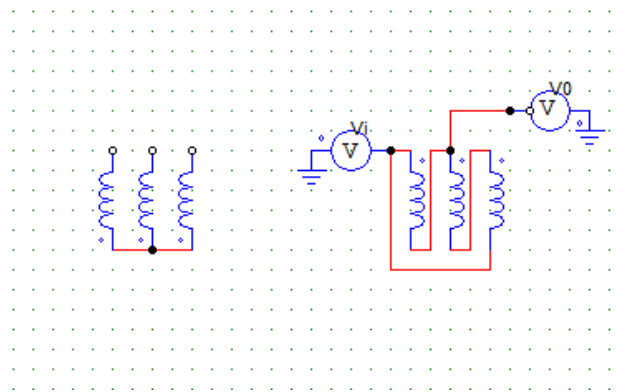
	inU-inV	inV-inW	inU-inW
<b>Desviación típica</b>	0.0159	0.0116	0.0070
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.9866 %	99.9926 %	99.9974 %

Como se aprecia en la gráfica, las tres funciones de transferencia son muy similares y la única que se desvía un poco de las otras dos es la de la fase V, en la que las transiciones crecimiento-decrecimiento se dan algo antes que en las otras dos fases. Esto se puede cuantificar también con los valores del coeficiente de correlación (CC) y la desviación típica. Para el caso U-V y V-W, el CC es menor que para U-W y la desviación típica mayor (cuando una crece, el otro decrece y

viceversa), ya que las curvas de U y de W son más parecidas que cualquiera de ellas con V. El coeficiente de correlación no expresa tanta diferencia en sus valores que lo que se aprecia visualmente, pero esto es debido a que, al ser una escala logarítmica, hay muchos más puntos en las zonas de muy altas y bajas frecuencias, donde la similitud entre curvas es mayor, que en los rangos donde la función de transferencia de V se desvía de las otras dos. Esto se va a ir observando de aquí en adelante, para las configuraciones siguientes. Para remediarlo, habría que ir haciendo la correlación separando por rangos de frecuencias. Sin embargo, los valores son coherentes con las curvas más o menos parecidas entre sí. Con intención de ofrecer algo más de precisión, el coeficiente de correlación se muestra en porcentaje, para así tener dos cifras significativas más.

#### 4.2.1.2.- Configuración 2

En la configuración 2 se cambió el cableado como se indica: se dejó el primario en circuito abierto y la entrada se colocó primero en U, luego en V y por último en W del devanado secundario. La salida se midió en el otro terminal de la misma fase en que se colocó la entrada.



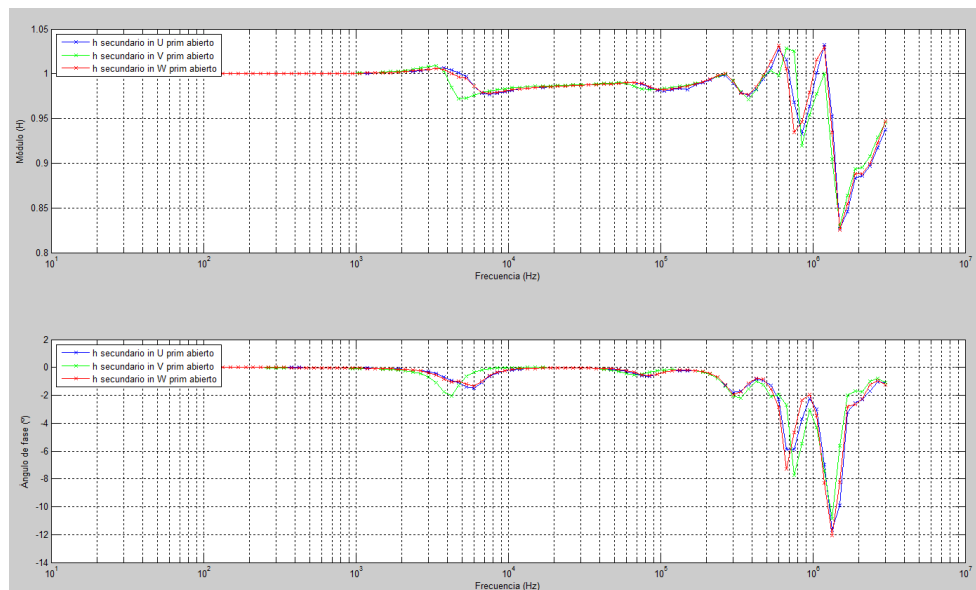
**Figura 4. 12. Configuración 2 para medida de función de transferencia de entrada por fase U del secundario con primario en vacío. [Elaboración propia]**

Esta configuración generó unas funciones de transferencia que se obtienen con los datos de los ficheros:

- h\_sec\_inU\_primabto
- h\_sec\_inV\_primabto
- h\_sec\_inW\_primabto

En Matlab se obtuvieron las gráficas de cada fichero por separado y las tres juntas, que es la figura que se muestra a continuación. Como en la configuración anterior, se muestra la desviación típica y correlación cruzada dos a dos:





**Figura 4. 13. Funciones de transferencia de entrada por fase U, V y W del secundario con primario en vacío.**  
[Elaboración propia]

Al igual que en la configuración anterior, se observan varios cambios de tendencia en las tres curvas, aunque en frecuencias diferentes (en torno a 5kHz, 600kHz y 1MHz), lo que es esperable por ser devanados diferentes.

**Tabla 4. 2. DT y CC para funciones de transferencia de fase U, V y W en secundario con primario en vacío.**  
[Elaboración propia]

	inU-inV	inV-inW	inU-inW
<b>Desviación típica</b>	0.0107	0.0128	0.0052
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.9942 %	99.9917 %	99.9987 %

En esta ocasión, las tres curvas son mucho más similares que en la configuración anterior (alimentación en primario), aunque se vuelve a apreciar una pequeña diferencia entre la fase V y las otras dos, que son casi iguales. De nuevo estas diferencias en las gráficas se reflejan en los datos del coeficiente de correlación y la desviación típica.

#### 4.2.1.3.- Configuración 3

Esta configuración tiene el secundario cortocircuitado. La entrada se hace en el primario, moviéndolo por las fases U, V y W y la salida en el neutro del primario.

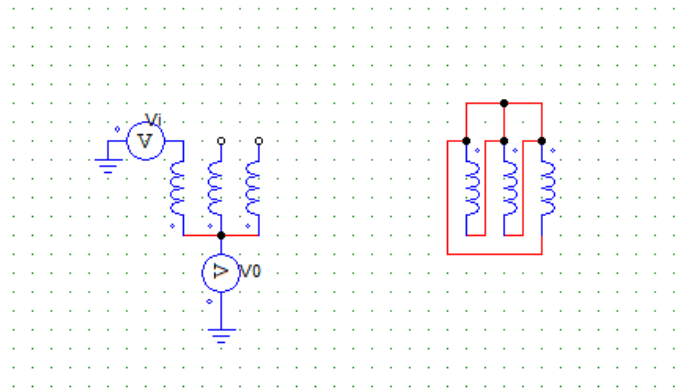


Figura 4. 14. Configuración 3. Para función de transferencia para U en primario y secundario en cortocircuito [Elaboración propia]

Estas medidas generaron tres funciones de transferencia cuyos ficheros son:

- h\_prim\_inU\_secCC
- h\_prim\_inV\_secCC
- h\_prim\_inW\_secCC

Las figuras que devuelve la simulación de Matlab son:

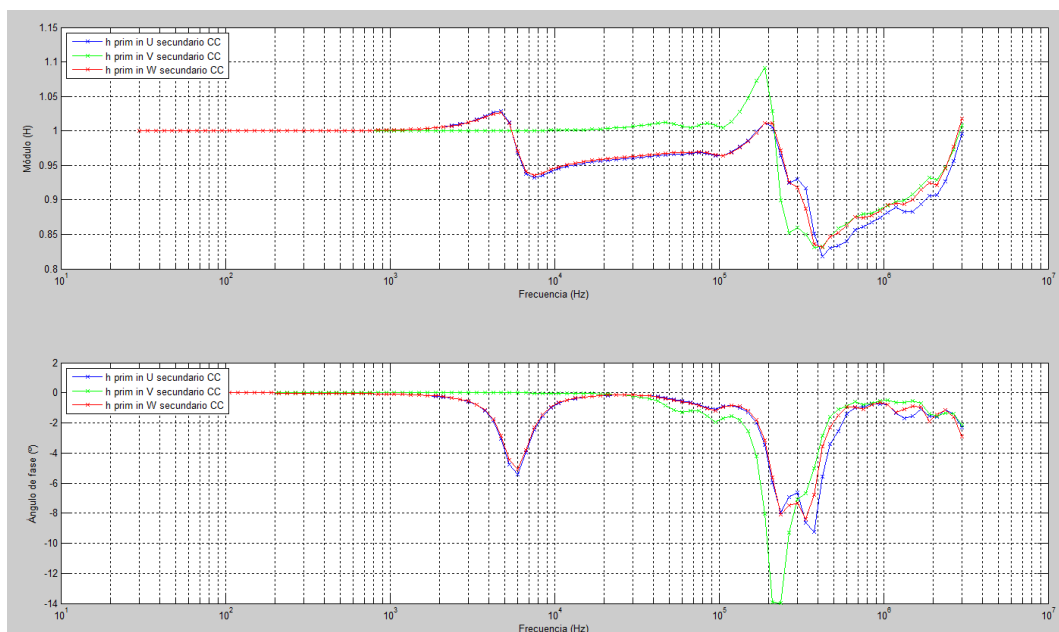


Figura 4. 15. Funciones de transferencia para entrada por U, V y W del primario con el secundario en cortocircuito. [Elaboración propia]

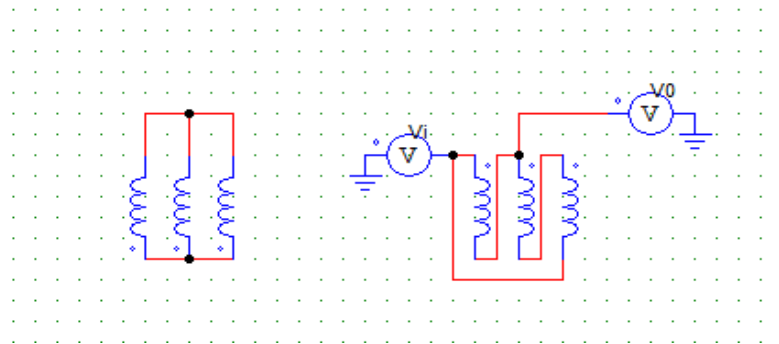
Tabla 4. 3. DT y CC de las funciones de transferencia para entrada por U, V y W del primario con el secundario en CC [Elaboración propia]

	inU-inV	inV-inW	inU-inW
Desviación típica	0.0333	0.0310	0.0080
Coefficiente de correlación	99.9533 %	99.9576 %	99.9970 %

En esta ocasión, la diferencia de la fase V con las demás es claramente notable, sobre todo en el rango de frecuencias de 2 kHz a 400 kHz aproximadamente. Los parámetros estadísticos confirman esta diferencia entre fases aunque de manera atenuada, por lo explicado anteriormente. Con todo, la diferencia afecta a más de 4 centésimas en CC (anteriormente eran inferiores) y en DT es más notable, con 15 centésimas. También es remarcable que las funciones de transferencia ‘normales’ de entrada por U y V son muy parecidas en la figura 4.10 de la configuración en la que el secundario se encontraba en vacío, tanto las fluctuaciones de H y de ángulo, como las frecuencias resonantes.

#### 4.2.1.4.- Configuración 4

En esta configuración se cortocircuita el primario y la entrada se aplica tensión en el secundario, teniendo la salida en esa misma fase:

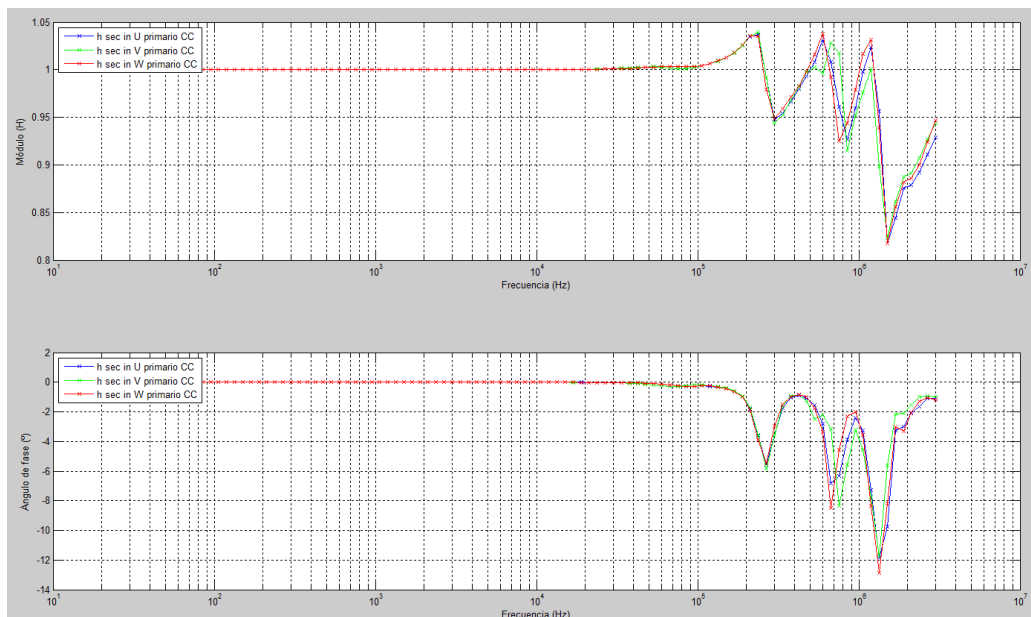


**Figura 4. 16. Configuración 4. Para función de transferencia con entrada en U, V y W del secundario con el primario en cortocircuito. [Elaboración propia]**

La función de transferencia de cada uno de ellos se generó a través de los datos del barrido en frecuencia de los ficheros:

- h\_sec\_inU\_primCC
- h\_sec\_inV\_primCC
- h\_sec\_inW\_primCC

Que en Matlab se visualiza como:



**Figura 4. 17. Funciones de transferencia para entrada por U, V y W del secundario con el primario en cortocircuito. [Elaboración propia]**

**Tabla 4. 4. DT y CC para las funciones de transferencia con entrada por U, V y W del secundario con el primario en cortocircuito. [Elaboración propia]**

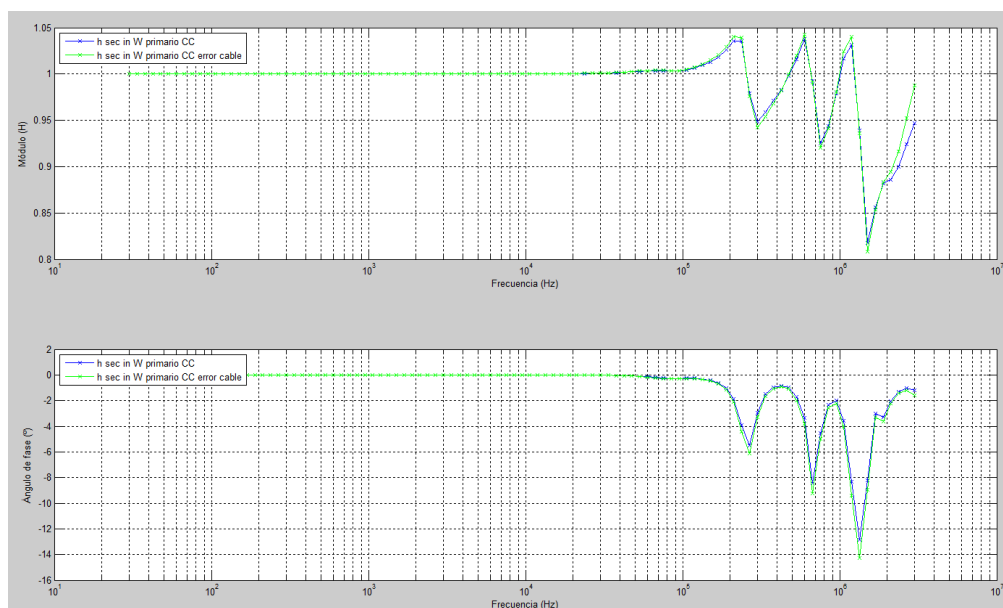
	inU-inV	inV-inW	inU-inW
<b>Desviación típica</b>	0.0104	0.0134	0.0064
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.9946 %	99.9910 %	99.9980 %

En esta configuración, las tres funciones de transferencia son muy similares, casi no se aprecia diferencia entre ellas, aunque hay un leve cambio para la fase V que afecta a varias milésimas CC y unas centésimas de DT. El cambio se debe a las modificaciones en unos pocos puntos de frecuencias superiores a 500kHz. Los parámetros estadísticos corroboran lo observado en la gráfica. En esta ocasión, si se compara con las dos gráficas de las configuraciones anteriores (Figura 4.10 y Figura 4.12), las frecuencias resonantes e intervalos de crecimiento/decrecimiento sí cambian por cambiar la configuración.

Con esta misma configuración, se hizo la prueba de cambiar el cable de conexión al canal de salida por otro más largo (en el caso de la inyección de señal por W, por ejemplo; aproximadamente tenía el doble de longitud del que se estaba usando originalmente). Con este cambio se buscaba ver el error que se podía estar cometiendo debido a la longitud de los cables de conexión. El fichero que generó fue:

- h\_sec\_inW\_primCC\_errorcable

Esta función de transferencia se comparó con la misma configuración (para la misma fase W) para el cable más corto que se había estado usando durante todos los barridos anteriores, obteniendo la siguiente gráfica y valores:



**Figura 4. 18. Funciones de transferencia para entrada por W del secundario y primario en cortocircuito. Comparación de longitud de cables. [Elaboración propia]**

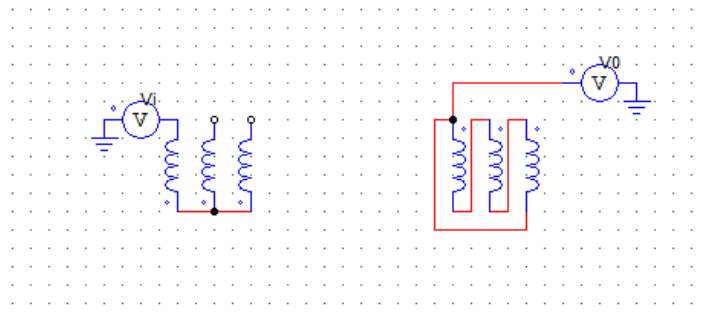
**Tabla 4. 5. DT y CC de funciones de transferencia para entrada por W del secundario con primario en cortocircuito. Comparación de longitud de cables. [Elaboración propia]**

	inW-inW_error_cable
<b>Desviación típica</b>	0.0105
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.9946 %

Después de ver la gráfica y el coeficiente de correlación y desviación típica, se llegó a la conclusión de que la longitud del cable no tenía una influencia significativa en los resultados. Como se puede ver, los valores de CC y DT son similares a la dispersión provocada por la medida en U y V, que en este caso era muy pequeña.

#### **4.2.1.5.- Configuración 5**

En la configuración 5 se puso la entrada en el primario, en cada una de las tres fases, y la salida en el secundario, también cambiando de una fase a otra en cada medida.



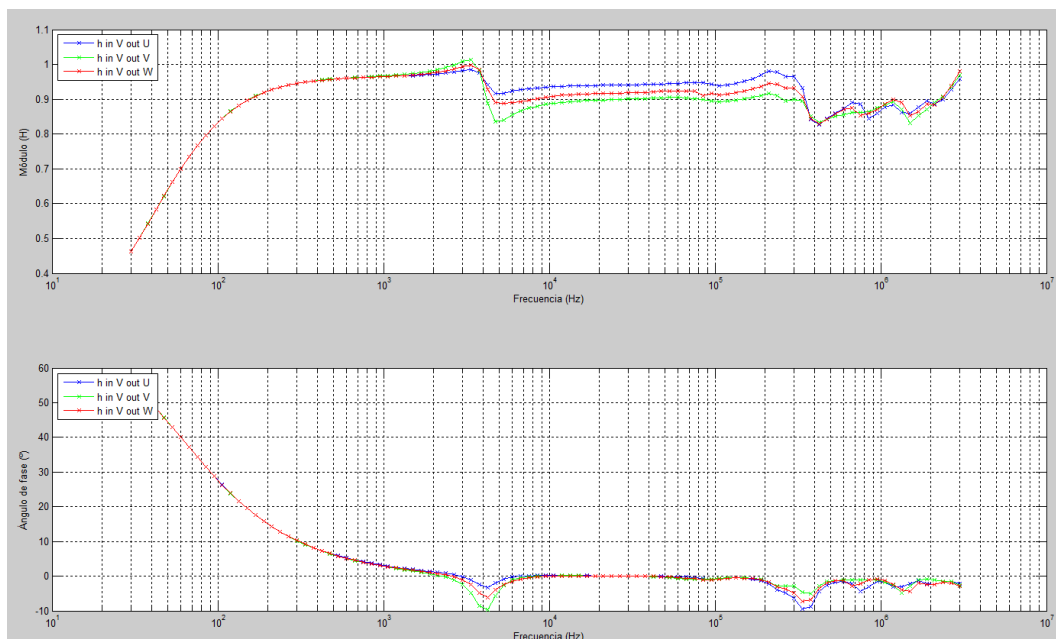
**Figura 4. 19. Configuración 5 para entrada por U, V y W del primario y salida por U, V y W del secundario.**  
[Elaboración propia]

Esta configuración generó los siguientes ficheros:

- h\_inU\_outU
- h\_inU\_outV
- h\_inU\_outW
- h\_inV\_outU
- h\_inV\_outV
- h\_inV\_outW
- h\_inW\_outU
- h\_inW\_outV
- h\_inW\_outW

A continuación se muestran las gráficas obtenidas en Matlab para cada una de las fases de entrada. No se presentan los datos de la fase U, porque, según se ha visto, es la fase más parecida a W en su comportamiento en las otras configuraciones:

- Para la entrada por la fase V:



**Figura 4. 20. Funciones de transferencia de entrada por V del primario y salida por U, V y W del secundario.**  
[Elaboración propia]

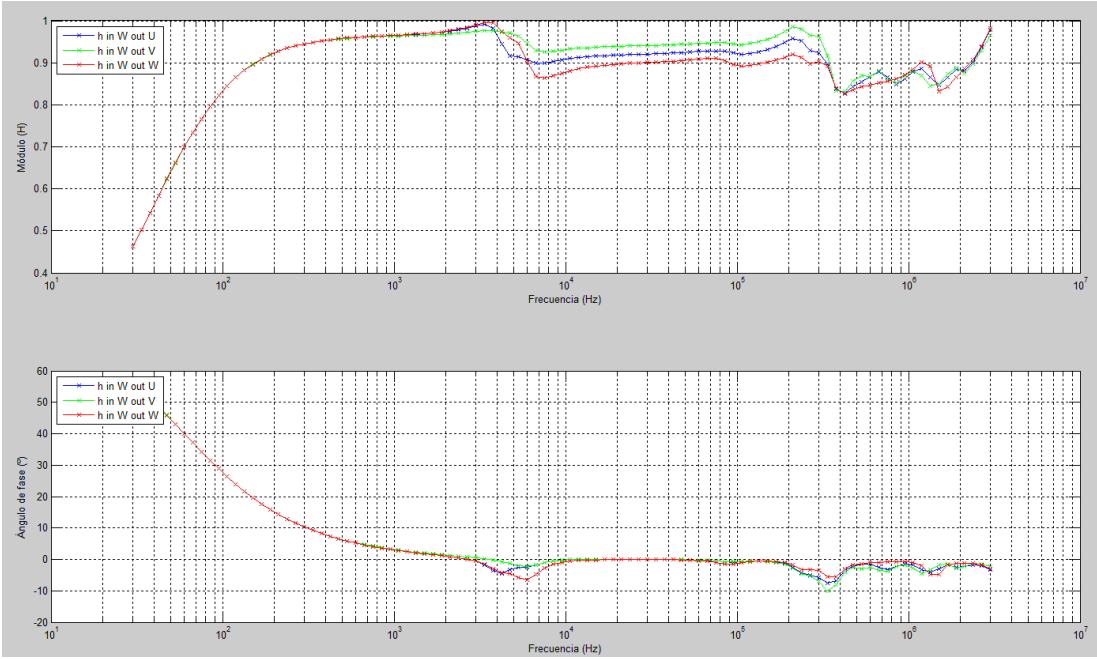
El comportamiento para las tres curvas parte de un esperado crecimiento de H para valores muy bajos: es lógico que, a bajas frecuencias, el acoplamiento entre entrada y salida para dos devanados diferentes (primario y secundario) sea bajo. Sin embargo, a mayores frecuencias, las capacidades parásitas permiten que ante una señal de entrada determinada, a la salida se mida una tensión apreciable. Conforme la frecuencia crece, el mismo comportamiento analizado para medidas entre inicio y final de una misma bobina se puede apreciar (sucesión de cambios de tendencia).

**Tabla 4. 6. DT y CC para función de transferencia de entrada por U del primario y salida por U, V y W del secundario. [Elaboración propia]**

	outU-outV	outV-outW	outU-outW
<b>Desviación típica</b>	0.0335	0.0168	0.0182
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.9530 %	99.9878 %	99.9855 %

Los valores de CC y DT concuerdan con la observación visual de las curvas: las de la salida en U y V son las más diferentes entre sí en un amplio rango de frecuencias.

- Para la entrada por la fase W:



**Figura 4. 21. Funciones de transferencia para entrada por fase W del primario y salida por U, V y W del secundario. [Elaboración propia]**

La forma de las curvas es muy similar a las que se obtenía con alimentación por la fase V.

**Tabla 4. 7. DT y CC de funciones de transferencia para entrada por fase W del primario y salida por U, V y W del secundario. [Elaboración propia]**

	outU-outV	outV-outW	outU-outW
<b>Desviación típica</b>	0.0171	0.0313	0.0179
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.9870 %	99.9578 %	99.9842 %

Los coeficientes parecen reflejar, una vez más, las diferencias visuales entre curvas (mayores para medidas de tensión de salida en V y W).

Se ha eliminado la representación de la fase U ya que tiene la tendencia, salvo a muy altas frecuencias, de una recta. La única explicación es que hubiera un contacto accidental entre U2 (final de la fase de AT) y u1 (inicio de la bobina de BT), aunque no es asegurable, o debido a un error en las medidas experimentales. Al no considerarse relevante para las conclusiones se ha decidido que lo mejor era eliminarlo. Sin embargo, en las otras dos fases de entrada, las tres funciones de transferencia son muy parecidas entre sí. Los dos parámetros estadísticos confirman estas observaciones.

A continuación se comparan los tres barridos del caso en el que la entrada y la salida se hacen en la misma fase, es decir, los correspondientes a los ficheros:

- h\_inU\_outU
- h\_inV\_outV
- h\_inW\_outW

Se obtuvieron las siguientes relaciones:

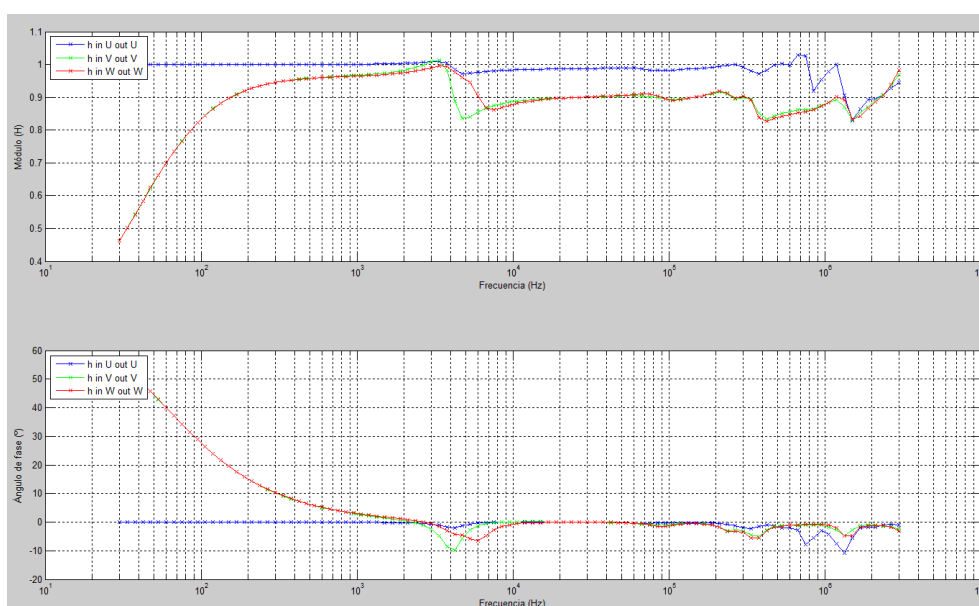


Figura 4. 22. Funciones de transferencia para entrada y salida por la misma fase. [Elaboración propia]

Tabla 4. 8. DT y CC para funciones de transferencia con la entrada y la salida por la misma fase. [Elaboración propia]

	outU-outV	outV-outW	outU-outW
<b>Desviación típica</b>	0.1456	0.0199	0.1445
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.3535 %	99.9755 %	99.3479 %

En la correlación y desviación típica se ve que las fases V y W son mucho más parecidas que cualquiera de ellas con U.



#### 4.2.2.- Medidas de Impedancia

Los ficheros generados para las impedancias del transformador 1 fueron:

- Z\_prim\_U
- Z\_prim\_V
- Z\_prim\_W
- Z\_sec\_U
- Z\_sec\_V
- Z\_sec\_W

Primero se compararon las tres impedancias del primario y después las tres del secundario:

- Primario:

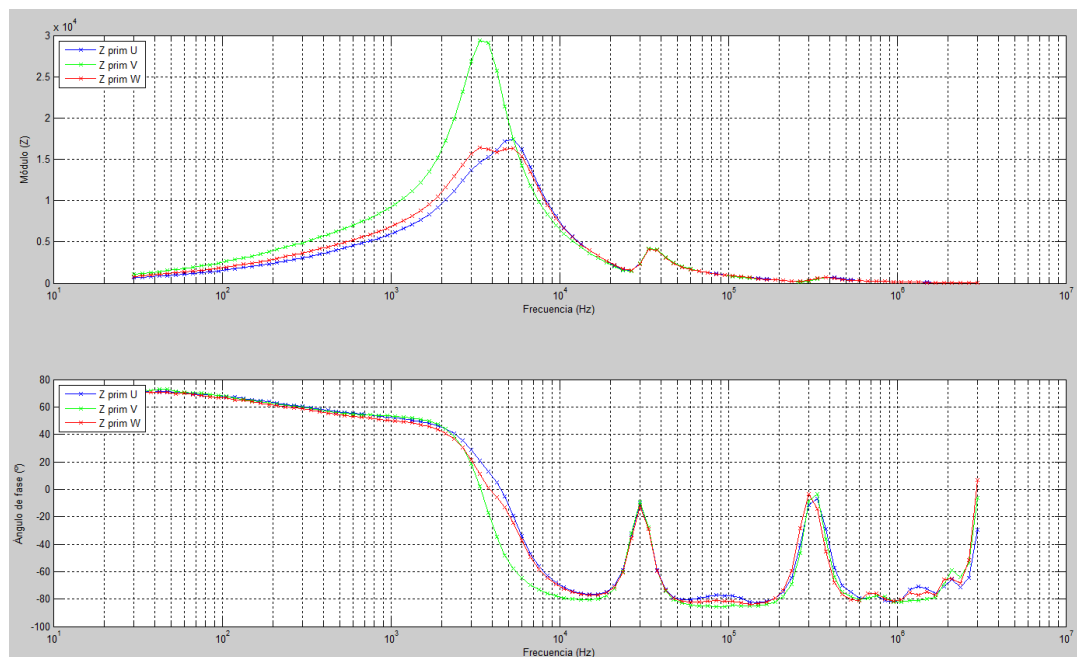


Figura 4. 23. Impedancias del devanado primario. [Elaboración propia]

Tabla 4. 9. DT y CC de impedancias del primario. [Elaboración propia]

	ZprimU-ZprimV	ZprimV-ZprimW	ZprimU-ZprimW
<b>Desviación típica</b>	3.4083x10 <sup>3</sup>	2.9451x10 <sup>3</sup>	597.1236
<b>Coefficiente de correlación</b>	95.7193 %	97.3850 %	99.6083 %

Claramente, la fase V difiere bastante de las otras dos, como se ve en la gráfica y en los parámetros estadísticos. Estas diferencias ya se apreciaban en las medidas de función de transferencia. Esta diferencia podría ser debida a que, al ser la fase central, la reluctancia es distinta que en las otras dos, que tienen similar geometría (y cuyas funciones de transferencia

son casi iguales). Más aún, la fase central presenta caminos para flujos parásitos (de dispersión, que afectan a sus reactancias del circuito equivalente) diferentes de las otras dos.

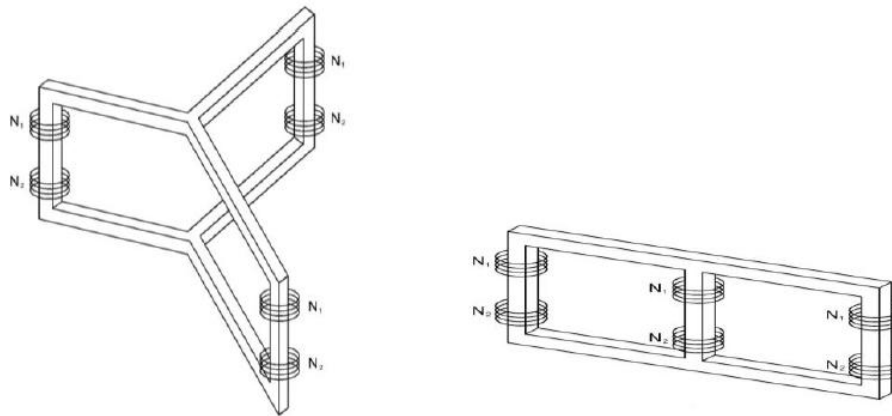


Figura 4. 24. Transformador trifásico. La fase central sería la que en este trabajo se ha llamado V. [27]

Con respecto a las desviaciones típicas, viendo su fórmula, que ya se presentó en el Capítulo 3 (3.29):

$$SD_{(X,Y)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{N - 1}}$$

Se observa que, al contrario que el coeficiente de correlación, que es adimensional, este parámetro no lo es, por lo que con respecto a los valores que tienen las impedancias, aunque puedan parecer valores grandes, no lo son tanto.

- Devanado secundario:

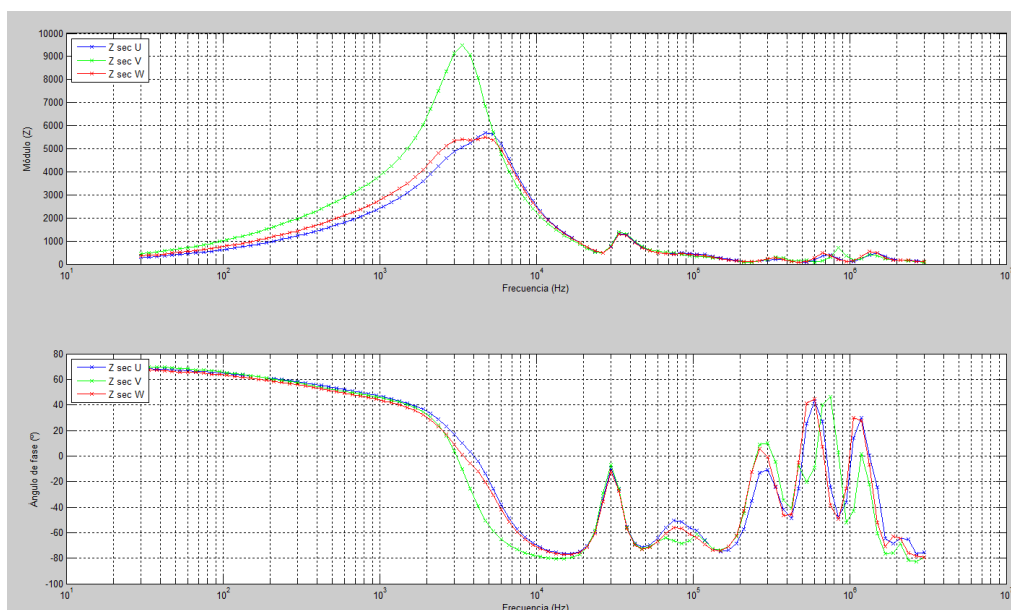


Figura 4. 25. Impedancias del devanado secundario. [Elaboración propia]

**Tabla 4. 10. DT y CC de las impedancias del devanado secundario. [Elaboración propia]**

	<b>secU-secV</b>	<b>secV-secW</b>	<b>secU-secW</b>
<b>Desviación típica</b>	1.1493x10 <sup>3</sup>	995.3321	197.6857
<b>Coefficiente de correlación</b>	96.6844 %	97.9444 %	99.6857 %

De nuevo la fase V es la que presenta más diferencias y la U y W se parecen mucho entre sí. La explicación hecha para el primario puede aplicarse aquí de la misma manera. La tendencia en las desviaciones típicas se repite.

### **4.3.- Medidas en Transformador 2**

Para el transformador 2 se siguieron exactamente los mismos pasos que para el 1, manteniendo también las conexiones y las distintas configuraciones que en el anterior. Es un transformador 220/127 V, igual que el 1, disponible en el puesto 2 del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

La razón por la que en este segundo transformador solo se hicieron en alguna ocasión las medidas para una o dos fases es que el equipo tiene un software que permite representar los ficheros que se han ido obteniendo durante el proceso experimental. Al hacer la comparación en el laboratorio entre este fichero y el obtenido para el transformador 1 y ver que eran tan sumamente parecidos, se estimó que resultaría redundante hacer el barrido para el resto de fases, ya que saldrían casi iguales que las hechas para el primer transformador. Esta dinámica se repite en varias de las configuraciones que siguen. Aún así, si el lector quiere consultarlo, la mayoría de las medidas que han sido obviadas aquí pueden consultarse en el Anexo B

#### **4.3.1.- Función de transferencia**

##### **4.3.1.1.- Configuración 1**

De nuevo en la configuración 1, se alimenta el primario en las distintas fases U, V y W, que están conectadas en estrella y la salida se mide en el neutro del primario. El secundario (en vacío) mantiene su conexión en triángulo.

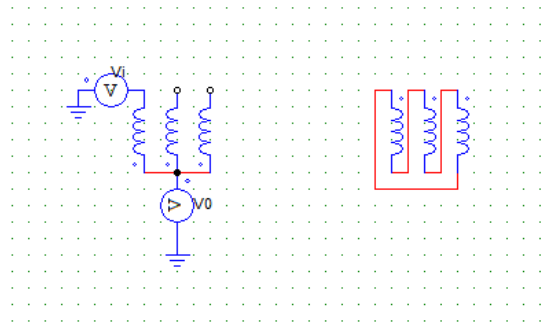


Figura 4. 26. Configuración 1 para funciones de transferencia, entrada por las fases U, V y W del primario con salida en el neutro y secundario en vacío. [Elaboración propia]

De la configuración 1 para el transformador 2 se obtuvieron los siguientes ficheros para formar la función de transferencia  $H(w)$ :

- h2\_prim\_inU\_secabto
- h2\_prim\_inV\_secabto
- h2\_prim\_inW\_secabto

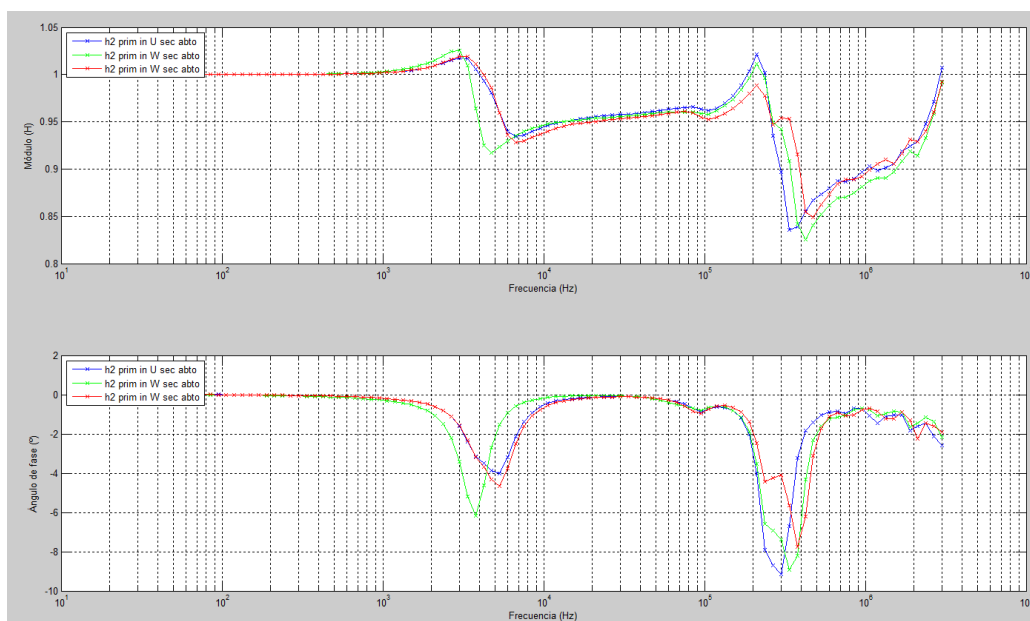


Figura 4. 27. Funciones de transferencia para entrada por U, V y W del primario y secundario en vacío. [Elaboración propia]

Mirando esta gráfica y comparándola con la obtenida para esta misma configuración en el Transformador 1, se ve que son muy parecidas y tienen las mismas tendencias en los mismos rangos de frecuencias (tres crecimientos con la frecuencia superpuestos con dos reducciones (alrededor de 5kHz y 400kHz)).

Tabla 4. 11. DT y CC para funciones de transferencia de la configuración 1. [Elaboración propia]

	inU-inV	inV-inW	inU-inW
<b>Desviación típica</b>	0.0158	0.0165	0.0167
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.9874 %	99.9861 %	99.9852 %

La fase V es la que más difiere de las otras dos lo que se confirma con la desviación típica y la correlación cruzada.

#### 4.3.1.2.- Configuración 2

El esquema de la configuración es el que se ha explicado para el transformador 1 y que se muestra a continuación:

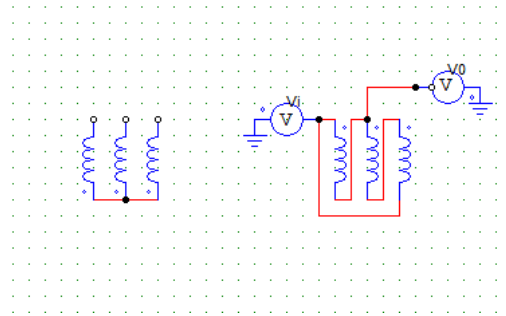


Figura 4. 28. Configuración 2. Entrada por las fases del secundario y primario en vacío. [Elaboración propia]

Como las correlaciones entre curvas de diferentes fases, para estas configuraciones, eran muy elevadas, con el segundo transformador no se repitieron todas las medidas. El fichero que se generó fue:

- h2\_sec\_inU\_primabto

Se comparó con el obtenido para la misma configuración y fase del transformador 1, h\_sec\_inU\_primabto del primario, y se obtuvo:

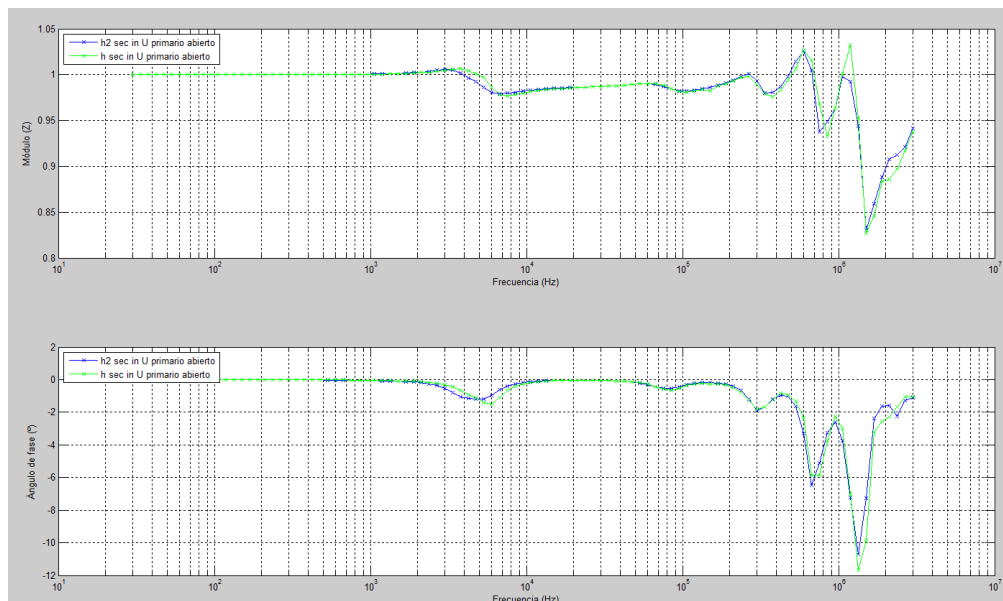


Figura 4. 29. Funciones de transferencia para entrada por U del secundario con primario abierto del transformador 1 y del 2. [Elaboración propia]

Tabla 4. 12. DT y CC de la configuración 2 para el T1 y el T2

	inU_T1-inU_T2
Desviación típica	0.0115
Coefficiente de correlación	99.9932 %

Como se puede apreciar, las gráficas son muy parecidas, circunstancia confirmada con los valores de correlación y desviación típica.

#### 4.3.1.3.- Configuración 3

La configuración 3 se muestra en el esquema:

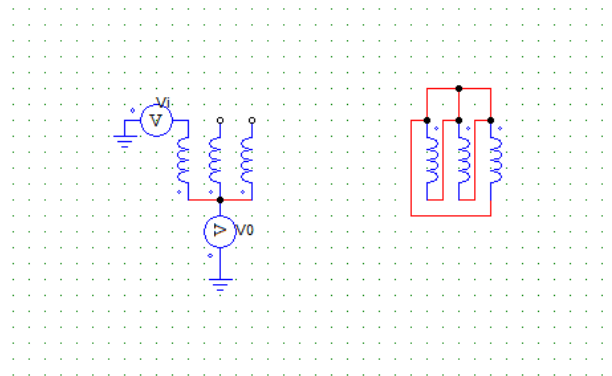
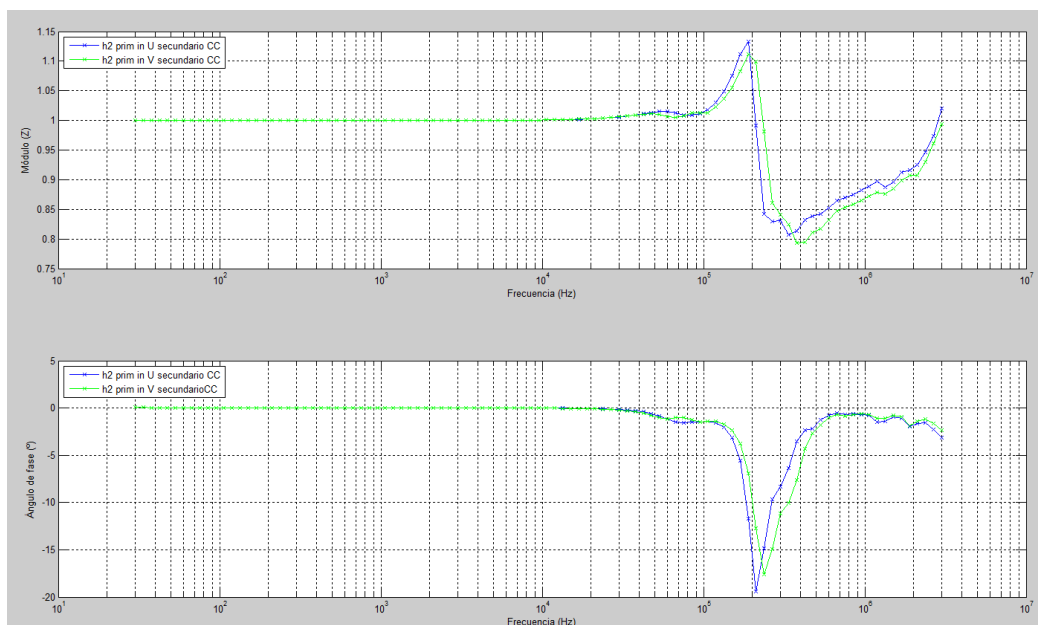


Figura 4. 30. Configuración 3. Entrada para las distintas fases del primario con el secundario en cortocircuito.  
[Elaboración propia]

El barrido de frecuencia generó los ficheros para formar las funciones de transferencia:

- h2\_prim\_inU\_secCC
- h2\_prim\_inV\_secCC

Se comparan ambas con la herramienta Matlab:



**Figura 4. 31. Funciones de transferencia para entrada por U y V del primario con el secundario en cortocircuito.**  
[Elaboración propia]

**Tabla 4. 13. DT y CC para las funciones de transferencia para entrada por U y V con el secundario en CC.**  
[Elaboración propia]

	inU-inV
<b>Desviación típica</b>	0.0630
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.7991 %

Se observa que son casi iguales y los parámetros estadísticos lo confirman.

También se hizo la comparación de cada uno de estos ficheros con su homólogo del transformador 1 y se vio que en la entrada por U sí que había cierta diferencia. Esta gráfica se muestra en la siguiente figura, aunque solo la hecha para la entrada en U, ya que la de entrada en V es muy similar. Todas las medidas realizadas que aquí se han obviado por repetitivas se pueden encontrar en el Anexo.

- h2\_prim\_inU\_secCC con h\_prim\_inU\_secCC:

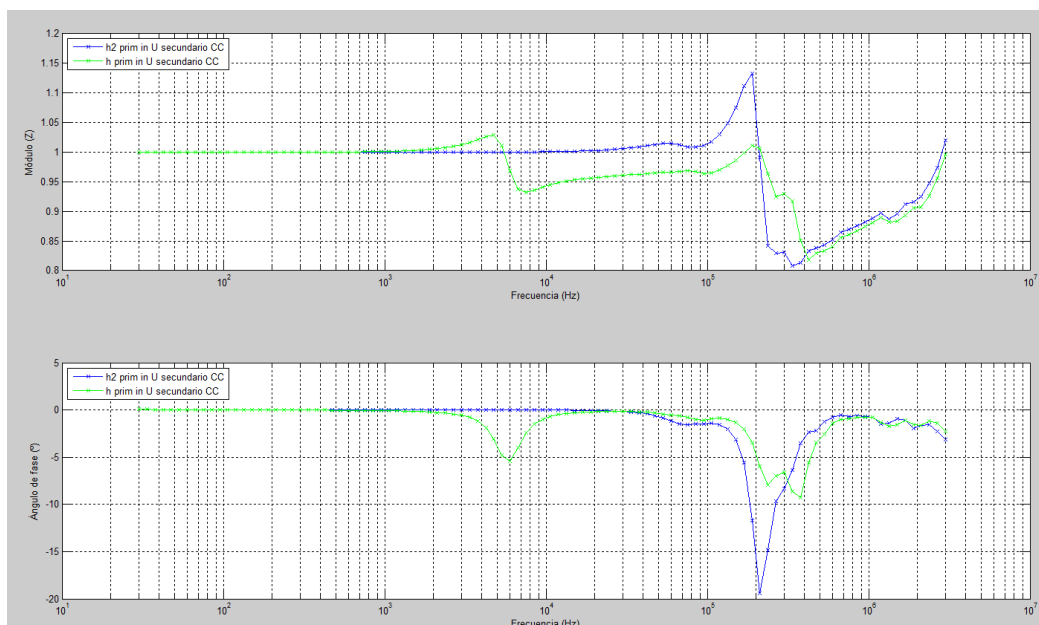


Figura 4. 32. Funciones de transferencia de la configuración 3 para la entrada en U del T1 y el T2. [Elaboración propia]

Tabla 4. 14. DT y CC para configuración 3 con entrada en U del T1 y T2

	inU_T1-inU_T2
Desviación típica	0.0621
Coefficiente de correlación	99.8039 %

En esta ocasión, las dos gráficas son bastante distintas, pero curiosamente, si comparamos la curva azul (la de T2) en la Figura 4.32 con la obtenida para esta misma configuración en el transformador 1 (Figura 4.15), observaremos que es muy parecida a la que era diferente en esa ocasión, que era la fase V.

#### 4.3.1.4.- Configuración 4

La configuración 4 se muestra en el esquema:

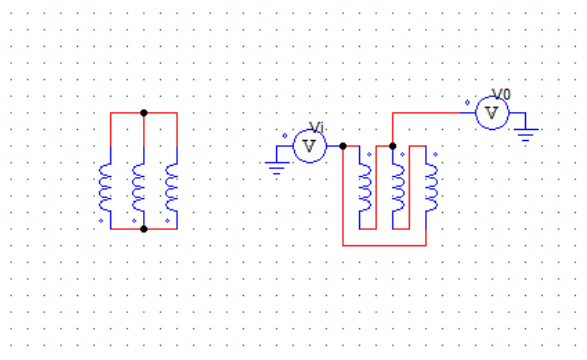


Figura 4. 33. Configuración 4. Entrada por las fases del secundario con el primario en cortocircuito. [Elaboración propia]



Después del barrido, Solartron generó el siguiente fichero:

- h2\_sec\_inU\_primCC

Se comparó con la misma configuración para el transformador 1, y para la misma fase, obteniendo:

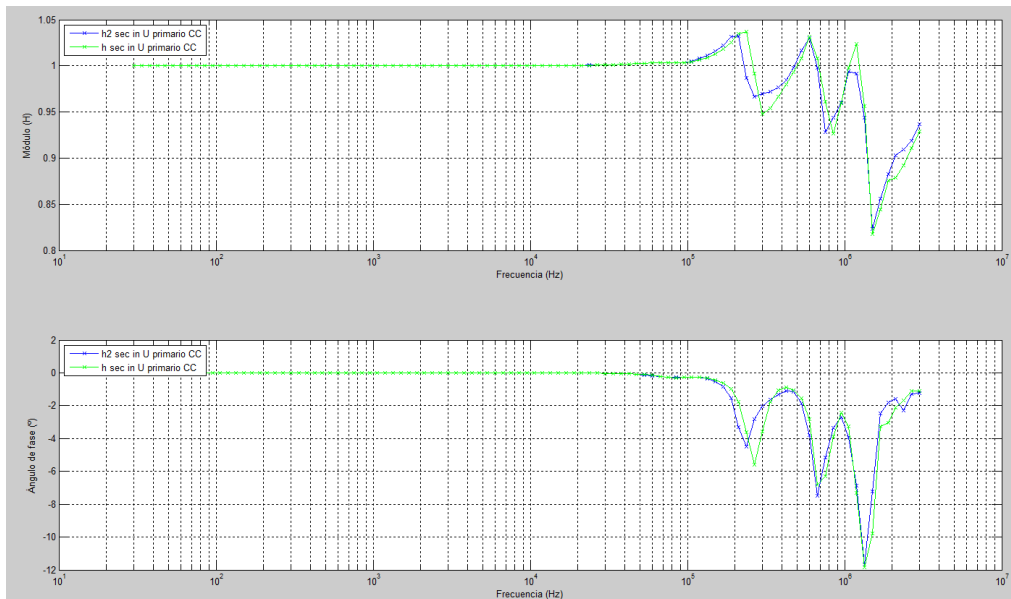


Figura 4. 34. Funciones de transferencia para Configuración 4 con entrada en U del secundario para T1 y T2

Tabla 4. 15. DT y CC para configuración 4 con entrada en U del secundario para T1 y T2

	inU_T1-inU_T2
Desviación típica	0.0178
Coefficiente de correlación	99.9854 %

De nuevo la similitud es muy grande en ambos transformadores.

#### 4.3.1.5.- Configuración 5

La configuración 5, igual que para el transformador 1, es la siguiente:

Los ficheros generados para cada la fase U con sus salidas son:

- Fase de entrada U:

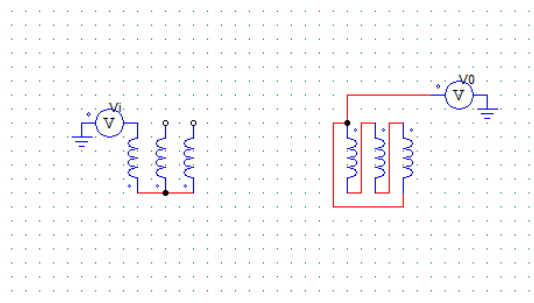


Figura 4. 35. Configuración 5. Entrada por las fases del primario y salida por las fases del secundario.  
[Elaboración propia]

- h2\_inU\_outU
- h2\_inU\_outV
- h2\_inU\_outW

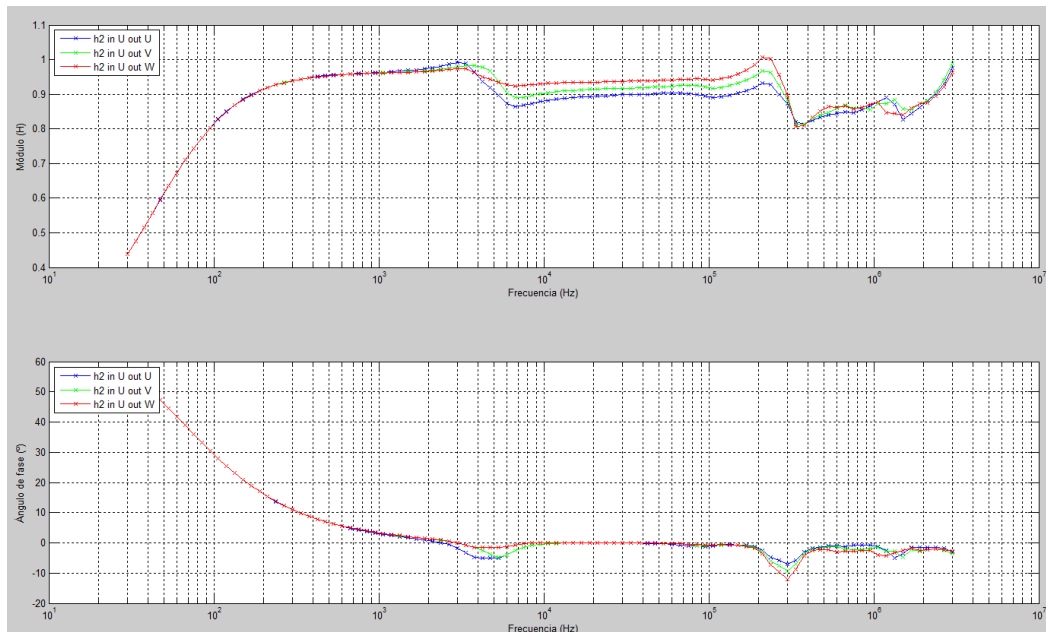


Figura 4. 36. Funciones de transferencia para configuración 5 con la entrada en U del primario y salida en U, V y W del secundario. [Elaboración propia]

Tabla 4. 16. DT y CC para funciones de transferencia para configuración 5 con entrada en U del primario y salida en U, V y W del secundario. [Elaboración propia]

	outU-outV	outV-outW	outU-outW
<b>Desviación típica</b>	0.0173	0.0169	0.0305
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.9880 %	99.9850 %	99.9600 %

Las tres gráficas son muy parecidas, lo que se confirma con la desviación y correlación.

Se han omitido las otras dos fases de entrada ya que los resultados no aportaban nada nuevo aparte de lo ya visto en la fase U.

#### 4.3.2.- Impedancias

Como se hizo con el transformador 1, se midieron también las impedancias de cada fase del devanado primario y del secundario para el transformador 2. Las impedancias que se obtuvieron se representan a través de los ficheros:

- Z2\_prim\_U
- Z2\_prim\_V
- Z2\_prim\_W
- Z2\_sec\_U
- Z2\_sec\_V
- Z2\_sec\_W

- Se comparan primero las tres fases del devanado primario:

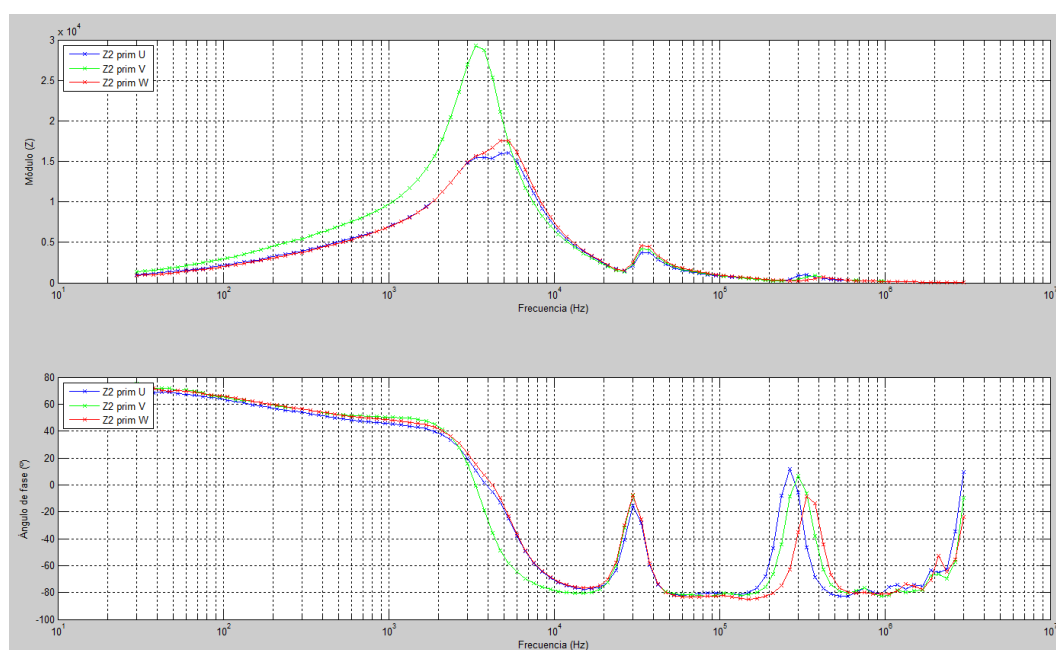


Figura 4. 37. Impedancias del devanado primario del transformador 2. [Elaboración propia]

Tabla 4. 17. DT y CC de las impedancias del devanado primario. [Elaboración propia]

	primU-primV	primV-primW	primU-primW
<b>Desviación típica</b>	$3.1884 \times 10^3$	$3.1232 \times 10^3$	378.0877
<b>Coefficiente de correlación</b>	97.2044 %	96.6125 %	99.8782 %

De igual manera que en el transformador 1, la fase V difiere significativamente de las otras dos. También de igual manera que anteriormente, se puede explicar esta diferencia por la diferente reluctancia y reactancia de dispersión debida a la diferente geometría por ser la fase central.

En las tres fases del secundario se observa la misma tendencia de la fase V y la similitud entre las otras dos, por lo que no se muestra aquí, pero sí en el Anexo.

Por último, se van a comparar las impedancias del transformador 1 con las del transformador 2, cada una con su fase del devanado correspondiente. En el primario:

- Fase U:

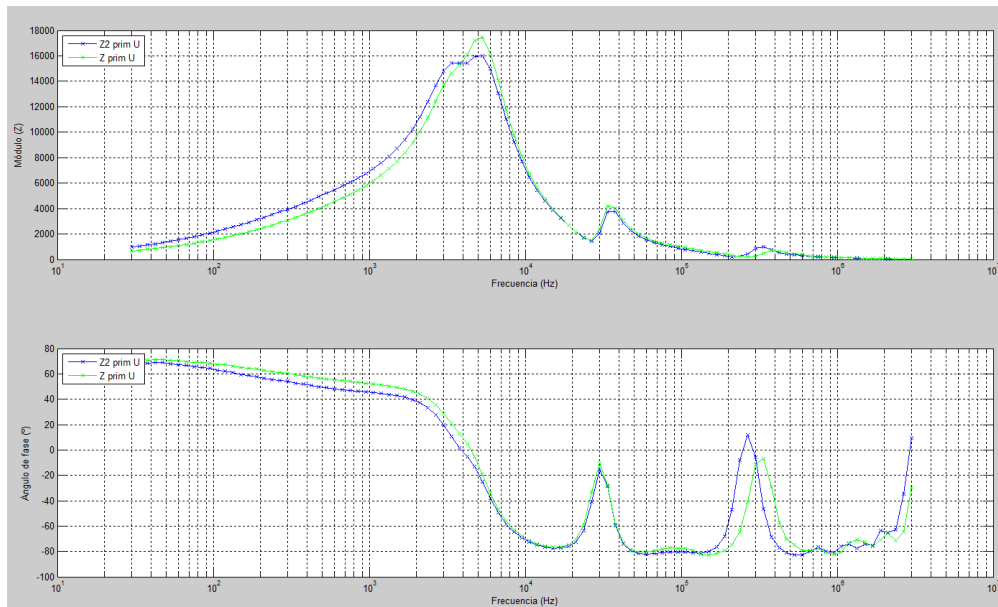


Figura 4. 38. Impedancias de la fase U del primario del T1 y T2. [Elaboración propia]

Tabla 4. 18. DT y CC de las impedancias de la fase U de T1 y T2. [Elaboración propia]

	primU_T1-primU_T2
Desviación típica	$3.8173 \times 10^3$
Coefficiente de correlación	98.5792 %

- Fase V:

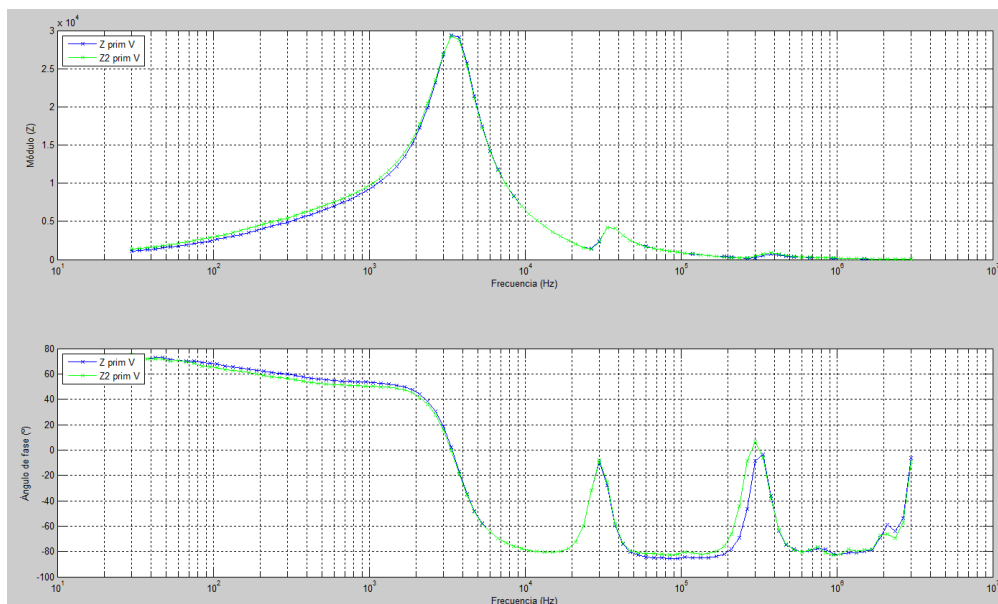


Figura 4. 39. Impedancias de la fase V del primario para el T1 y el T2. [Elaboración propia]

Tabla 4. 19. DT y CC de las impedancias de la fase V del T1 y T2. [Elaboración propia]

	primV_T1-primV_T2
<b>Desviación típica</b>	$6.5540 \times 10^3$
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.9585 %

- Fase W:

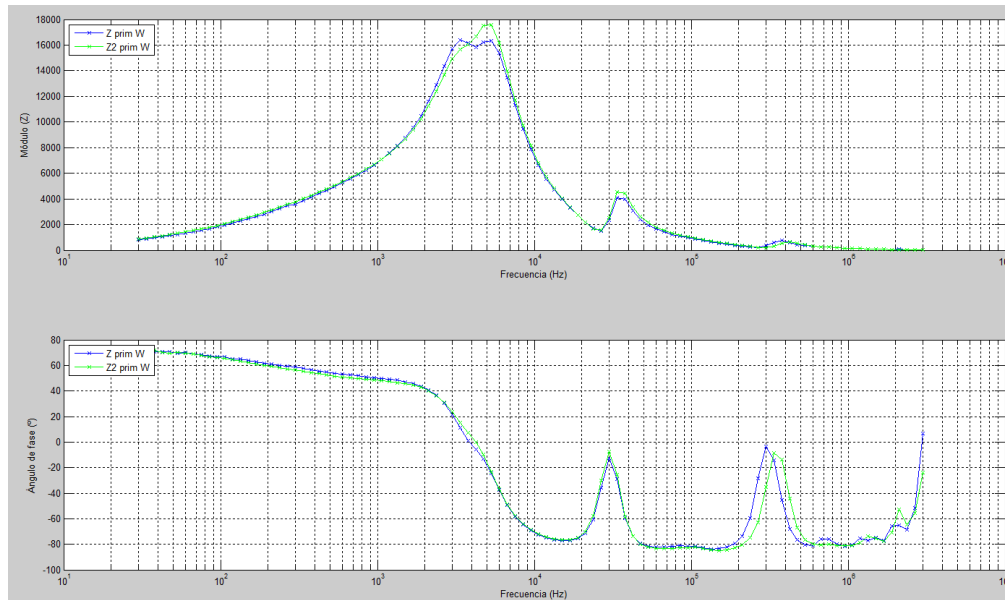


Figura 4. 40. Impedancias de la fase W para T1 y T2. [Elaboración propia]

Tabla 4. 20. DT y CC de las impedancias de la fase W para T1 y T2. [Elaboración propia]

	primW_T1-primW_T2
<b>Desviación típica</b>	$4.0564 \times 10^3$
<b>Coefficiente de correlación</b>	99.4568 %

Las tres impedancias son muy parecidas en ambos transformadores, salvo por alguna pequeña desviación. El coeficiente de correlación y la desviación típica así lo confirman. En las desviaciones típicas encontramos los mismos rangos de valores que en el Transformador 1, pero, como ya se ha explicado, pueden considerarse normales.

En este capítulo se muestran solo las del devanado primario por no resultar repetitivo, las del secundario se pueden encontrar en el Anexo para su consulta.

## Capítulo 5: Presupuesto

Concepto	Horas/Nº ítems	Coste unitario	Coste total (€)
Ingeniero Junior	350 h	20 €/h	7000
Licencia Matlab	1	0 €/h(se hizo en la universidad)	0
Licencia artículos IEEE	24	0 €/h (se hizo en la universidad)	0
Amortización del ordenador portátil	1	980€	245
IVA (21%)			1521,45
Coste total			8766,45 €

En la tabla del presupuesto se refleja lo que se ha usado y las horas que se han empleado para cada tarea.

En primer lugar se encuentran mis horas de trabajo, que han sido unas 350, sin poder calcular el número exacto de ellas pero sí de manera bastante aproximada. Le sigue la licencia de Matlab, a la que se le ha puesto un coste de 0 € ya que se ha usado el programa en la universidad. Si no hubiera sido de este modo, hubiera tenido un precio de 2000 € (la versión estándar en la que solo se incluye Matlab). Después se encuentran los artículos de IEEE descargados, que han sido un total de 24. Tampoco conllevan coste porque todos se han descargado desde los ordenadores de las aulas informáticas de la Universidad. Estos artículos tienen un coste de descarga de 13 \$ cada uno para miembros registrados en IEEE y de 31 \$ para personas no registradas. Por último se ha incluido la amortización del ordenador portátil utilizado. Se compró en 1 de mayo de 2013 y se amortiza en cuatro años ya que la amortización anual de equipos informáticos es un 25% de la base imponible.

A estos conceptos se le añade finalmente un 21 % de IVA, con lo que el coste total del proyecto queda en 8766,45 €, lo cual es un presupuesto bastante ajustado teniendo en cuenta la cantidad de horas que se le han dedicado al Trabajo.

## Capítulo 6: Conclusiones

Existen muchas técnicas para tratar de detectar mecanismos de degradación en transformadores. Una de ellas es el análisis de respuesta en frecuencia (FRA), de la que trata este Trabajo de Fin de Grado, una técnica de diagnóstico muy poderosa y extendida, usada para identificar diferentes fallos incipientes en los transformadores de potencia, la cual se ha postulado como una de las mejores técnicas para localizar deformaciones en los devanados de los transformadores.

Detectar los posibles fallos o desplazamientos en los devanados es de vital importancia ya que los transformadores de potencia son componentes indispensables de las centrales de generación de energía, los sistemas de transporte y las grandes plantas industriales. Los fallos inesperados en éstos producen perturbaciones graves en la red y su mal conservación conlleva unos costes enormes para las empresas, mucho mayores que el coste asociado su mantenimiento.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha hecho primero una síntesis de los mecanismos de degradación más comunes que afectan a los transformadores de potencia, haciendo un resumen de cada uno de ellos y explicando su influencia en la vida útil de un transformador. Después se ha pasado a hacer un resumen de la técnica del análisis de respuesta en frecuencia, explicando su propósito, su funcionamiento y aplicación, haciendo una breve alusión a los modelos de transformadores existentes y aplicables al FRA y por último, la exposición de algunos ejemplos seleccionados de aplicación de la técnica. Después, pasando a la parte experimental del Trabajo, se han probado dos transformadores del laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Carlos III de Madrid, aplicándoles la técnica mediante barridos de frecuencia obtenidos con Solartron. Las funciones de transferencia e impedancias obtenidas se han representado a través de la herramienta Matlab, que también obtenía su coeficiente de correlación y desviación típica. Con estos datos se han analizado las diferencias y similitudes encontradas e intentado explicar, en la medida de lo posible, por qué se habían producido. Por último, se ha presentado un breve presupuesto dando sobre todo más importancia a las horas que se han dedicado, ya que es un Trabajo de Fin de Grado principalmente de investigación y bibliografía, y herramientas que conllevan coste como la licencia de Matlab y los artículos de IEEE, se han obtenido con la licencia de la Universidad, por lo que no ha habido que pagar por ellos. En los Anexos se muestran el script de Matlab utilizado para el proceso experimental y del que se obtienen las gráficas y los parámetros estadísticos (Anexo A) y las fotos y todas las medidas realizadas en el laboratorio, incluso las que se han considerado repetitivas o que no aportaban nueva información por lo que no se habían incluido en el capítulo 4 (Anexo B).

Durante estos meses de trabajo empleados en la realización de este proyecto, he mejorado mucho mis capacidades con la bibliografía, ya que al empezar me encontré bastante perdida en el mundo de los transformadores, sin más referencia que lo aprendido en la asignatura de Circuitos Magnéticos y Transformadores. A partir de ahí, principalmente con artículos de IEEE he ido investigando la gran cantidad de referencias que existen, seleccionando a través de ellas, ya que la mayoría supera mi nivel con creces y poco a poco haciéndome con reseñas asequibles para mí.

Por supuesto en el campo de los conceptos de transformadores he aprendido mucho sobre aislamiento de transformadores, su mantenimiento y conservación, su importancia en el mundo eléctrico, también sobre su diagnóstico y, por supuesto, sobre la técnica del análisis de respuesta en frecuencia. De ese modo he ampliado mucho mis conocimientos a partir de los adquiridos en la asignatura de Transformadores. También, a través de la parte experimental, he podido hacer uso de un equipo FRA real, con el simulador de barridos y su software propio, las conexiones y los transformadores del laboratorio que, aunque sean de uso docente, me han permitido hacerme una idea de cómo sería la aplicación en un transformador mayor.

Otro punto reseñable ha sido el script realizado en Matlab, que puede dar la impresión de ser un código relativamente sencillo pero para mí, que solo había visto algo de Matlab por encima en la carrera, ha resultado una tarea dura y me ha llevado muchas horas delante del ordenador simulando y corrigiendo fallos. Después de enfrentarme a ello y adquirir los conocimientos de programación básica en Matlab, he descubierto lo poderosa que es la herramienta y la cantidad de cosas que se pueden hacer con ella para facilitar otras tareas.



## Bibliografía

- [1] WESTMAN, Thomas, et al. "En forma a los 50". ABB Revista. Enero 2010, p.63-65.
- [2] AUGUSTA, M. et al, "Power transformer end-of-life assessment –Pracana case study". IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.27, No. 6, 2011.
- [3] ABU-SIADA, A. "Understanding Power Transformer Frequency Response Analysis Signatures". IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 29, No 3, Mayo/Junio 2013, pp 48-56.
- [4] MARTÍNEZ TARIFA, Juan Manuel. Apuntes de la asignatura "Ingeniería de Alta Tensión", tema 5 "Mecanismos de degradación en equipos sometidos a Alta Tensión", Universidad Carlos III de Madrid, 2011, p. 7-14
- [5] HIDALGO AVILÉS, Pedro, et al. "Análisis de los efectos electrodinámicos y térmicos bajo condiciones de cortocircuito en una subestación convencional aplicado a la subestación de Ceibos de 69/13.8 kV" [en línea]. Escuela Politécnica Superior del Litoral, 2009. Disponible en web: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/84/1/74.pdf>
- [6] SAHA, Tapan K. "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, No. 5, 2003, pp. 903-914.
- [7] HEATHCOTE, Martin J. "The J&P Transformer Book", Thirteenth Edition, Newnes, 2007. ISBN 978-0-7506-8164-3.
- [8] "Dissolved Gas Analysis (DGA) of insulating fluids". Weidmann Diagnostic Solutions, Marzo 2012.
- [9] DUVAL, Michel. "A review of faults detectable by Gas-in-Oil analysis in transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 18, No. 3, 2002, pp 8-17.

- [10] GUBANSKI, S. M., "Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, No 3, 2003, pp 12-17.
- [11] MARTÍNEZ TARIFA, Juan Manuel. Apuntes de la asignatura "Ingeniería de Alta Tensión", Tema 6 "Métodos de evaluación de equipamiento eléctrico de Alta Tensión", Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [12] SAHA, Tapan K. et al. "Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 11, No. 1, 2004, pp. 144-154.
- [13] KUFFEL, E. et al. "High Voltage Engineering: Fundamentals"; 2da ed. Butterworth-Heinemann, 2000
- [14] Energo Complex. Consultado el 29-07-2015. Disponible en: <http://www.energo-complex.com/badania,transformatory-mocy,zaawansowana-diagnostyka.php>
- [15] SCHAFER, M. et al. "Thermische uberwachung von transformatoren", Ph.D. dissertation, Inst. Power transmission high voltage technology, Universidad de Stuttgart, Alemania, 2000.
- [16] IEEE 43-2000 (R2006): IEEE Recommended Practice for testing Insulation Resistance of rotating machinery, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, Nueva York, EEUU. ISBN 0-7381-1925-3
- [17] SECUE, J. et al. "Revisión del Análisis de Respuesta en Frecuencia para Evaluación de Desplazamientos y Deformaciones de Devanados en Transformadores de Potencia". IEEE Latin America Transactions, vol 5, No 5, Septiembre 2007, pp 321-328.
- [18] BAGHERI, Mehdi et al. "FRA vs. Short circuit impedance measurement in detection of mechanical defects within large power transformer". School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, Australia. IEEE, 2012, pp. 301-305.

[19] RAMOS, Ángel. "El circuito equivalente del transformador monofásico". Práctica 3, Circuitos magnéticos y transformadores, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, Septiembre 2013.

[20] GONZALEZ, Carlos. "Modelos de transformadores a altas frecuencias", Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas, Madrid.

[21] MORENO, M<sup>a</sup> Ángeles, "Transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos". Instalaciones Eléctricas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, enero 2011.

[22] MELO, Leonardo. "Aplicación de técnicas estadísticas al ensayo de Análisis de Respuesta en Frecuencia en transformadores de potencia". Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2012, pp. 33-56

[23] BAGHERI, Mehdi et al. "Frequency Response Analysis and Short-Circuit Impedance measurement in detection of winding deformation within power transformers". IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 29, No. 3, Mayo/Junio 2013, pp 33-40.

[24] ISLAM, Syed M. et al, "Locating transformer faults through sensitivity analysis of high frequency modeling using transfer function approach". Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Canada, 1996, pp. 38-41.

[25]ABU-SIADA, A. et al, "Understanding power transformer frequency response analysis signatures. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 29, No. 3, Mayo/Junio 2013, pp 48-56.

[26]1260 Impedance/Gain-phase Analyzer: Operating Manual. Solartron Group Ltd, Enero 1996.

[27] BURGOS, Juan Carlos. Tema 4, Transformadores trifásicos. Circuitos magnéticos y transformadores, Grado en Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid.



## ANEXO A

El script que permite representar las funciones de transferencia y las impedancias que se muestran en el Capítulo 4 y en el Anexo B es el que se muestra a continuación. Permite representar cada una de las funciones de transferencia o impedancias, las tres en conjunto para ver sus diferencias y también arroja los valores de correlación y desviación típica para cuantificar la similitud entre curvas. El ejemplo que se muestra es para los ficheros del transformador 1, en la configuración 1 (punto B.1.1.1):

```
clc
clear i j
close all
warning off
%% Figura 1. Fichero h_prim_inU_secabto
filename='h_prim_inU_secabto.txt';
load(filename, '-ascii')
f1= h_prim_inU_secabto(:,1);
re1= h_prim_inU_secabto(:,5);
im1= h_prim_inU_secabto(:,6);
Z1=re1+i.*im1;
mod1=abs(Z1);
ang1=angle(Z1); % rad
ang1d=ang1*180/pi;

fig=figure;
subplot(2,1,1)
semilogx(f1,mod1,'bx-')
title('h prim in U sec abierto')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Módulo (H)')
grid on

subplot(2,1,2)
semilogx(f1,ang1d,'bx-')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Ángulo de fase (°)')
grid on
print(fig, '-dpng')

%% Figura 2. Fichero h_prim_inV_secabto
filename='h_prim_inV_secabto.txt';
load(filename, '-ascii')
f2=h_prim_inV_secabto(:,1);
re2=h_prim_inV_secabto(:,5);
im2=h_prim_inV_secabto(:,6);
Z2=re2+i.*im2;
mod2=abs(Z2);
ang2=angle(Z2); % rad
ang2d=ang2*180/pi;

fig=figure;
subplot(2,1,1)
semilogx(f2,mod2,'bx-')
title('h prim in V sec abierto')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Módulo (H)')
grid on
```

```

subplot(2,1,2)
semilogx(f2,ang2d,'bx-')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Ángulo de fase (°)')
grid on
print(fig, '-dpng')

%% Figura 3. Fichero h_prim_inW_secabto
filename='h_prim_inW_secabto.txt';
load(filename, '-ascii')
f3=h_prim_inW_secabto(:,1);
re3=h_prim_inW_secabto(:,5);
im3=h_prim_inW_secabto(:,6);
Z3=re3+i.*im3;
mod3=abs(Z3);
ang3=angle(Z3); % rad
ang3d=ang3*180/pi;

fig=figure;
subplot(2,1,1)
semilogx(f3,mod3,'bx-')
title('h prim in W sec abierto')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Módulo (H)')
grid on

subplot(2,1,2)
semilogx(f3,ang3d,'bx-')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Ángulo de fase (°)')
grid on
%print(fig, '-dpng')

%% Figura 4 .Todas las gráficas juntas

fig=figure;
subplot(2,1,1)
semilogx(f1,mod1,'bx-')
hold on
semilogx(f2,mod2,'gx-')
semilogx(f3,mod3,'rx-')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Módulo (H)')
grid on
legend({'h prim in W sec abierto','h prim in W sec abierto', 'h prim
in W sec abierto'}, 'Location', 'NorthWest')

subplot(2,1,2)
semilogx(f1,ang1d,'bx-')
hold on
semilogx(f2,ang2d,'gx-')
semilogx(f3,ang3d,'rx-')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Ángulo de fase (°)')
grid on
legend({'h prim in W sec abierto','h prim in W sec abierto', 'h prim
in W sec abierto' }, 'Location', 'NorthWest')
print(fig, '-dpng')

```

```

%% Coeficiente de correlación y desviación típica
% entre datos "h_prim_inU_secabto" y "h_prim_inV_secabto"

% Módulos de impedancias

X=mod1;
Y=mod2;
CC12=(sum(X.*Y)/(sqrt(sum(X.^2).*sum(Y.^2)))*100);
SD12=sqrt(sum((X-Y).^2)/(length(X)-1));

disp('Entre datos "h_prim_inU_secabto.txt" y
"h_prim_inV_secabto.txt"')
disp(' Coeficiente de correlación (en porcentaje)')
disp(CC12)
disp('Desviación típica')
disp(SD12)

%% Coeficiente de correlación y desviación típica
% entre datos "h_prim_inV_secabto" y "h_prim_inW_secabto"

% Módulos de impedancias

X=mod2;
Y=mod3;
CC13=(sum(X.*Y)/(sqrt(sum(X.^2).*sum(Y.^2)))*100);
SD13=sqrt(sum((X-Y).^2)/(length(X)-1));

disp('Entre datos "h_prim_inV_secabto" y "h_prim_inW_secabto"')
disp(' Coeficiente de correlación (en porcentaje)')
disp(CC13)
disp('Desviación típica')
disp(SD13)

%% Coeficiente de correlación y desviación típica
% entre datos "h_prim_inU_secabto" y "h_prim_inW_secabto"

% Módulos de impedancias

X=mod1;
Y=mod3;
CC23=(sum(X.*Y)/(sqrt(sum(X.^2).*sum(Y.^2)))*100);
SD23=sqrt(sum((X-Y).^2)/(length(X)-1));

disp('Entre datos "h_prim_inU_secabto" y "h_prim_inW_secabto"')
disp(' Coeficiente de correlación (en porcentaje)')
disp(CC23)
disp(' Desviación típica')
disp(SD23)

```

## ANEXO B

### B.1. Transformador 1

#### B.1.1. Función de transferencia

##### B.1.1.1. Configuración 1

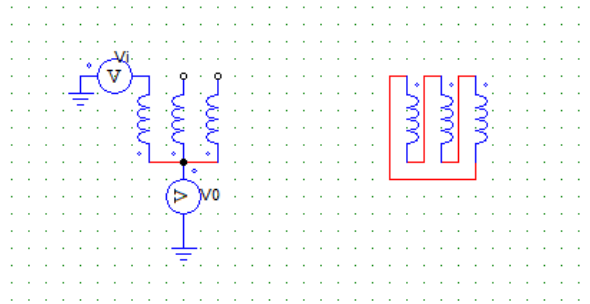


Figura B. 1. Configuración 1 para medida de función de transferencia de fase U en primario con secundario en vacío. [Elaboración propia]

Estos tres barridos de frecuencia generaron tres ficheros, que se llamaron:

- h\_prim\_inU\_secabto
- h\_prim\_inV\_secabto
- h\_prim\_inW\_secabto

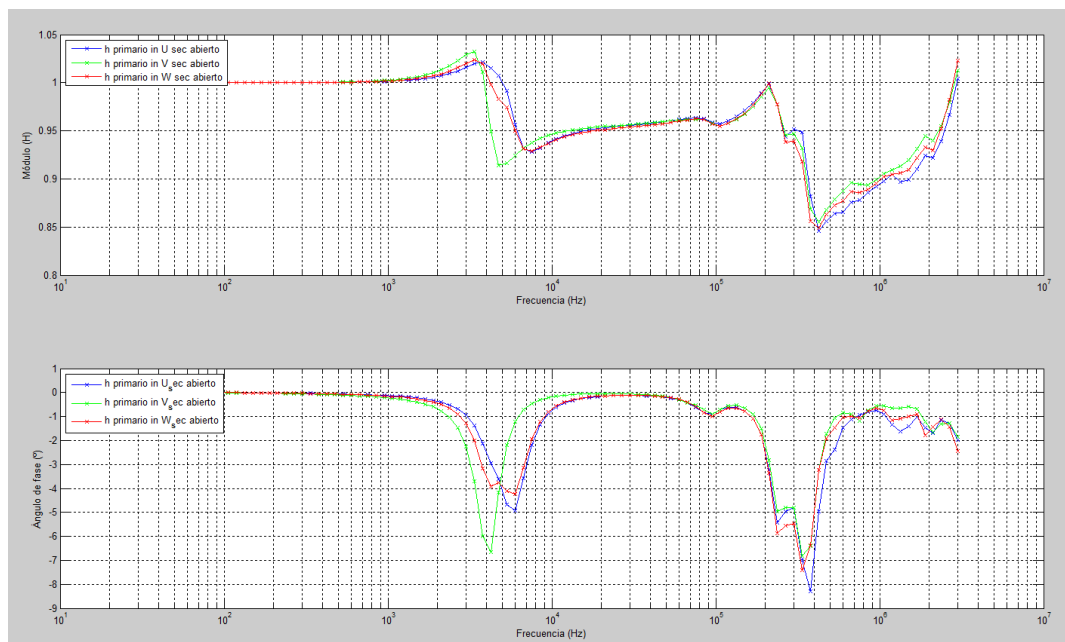


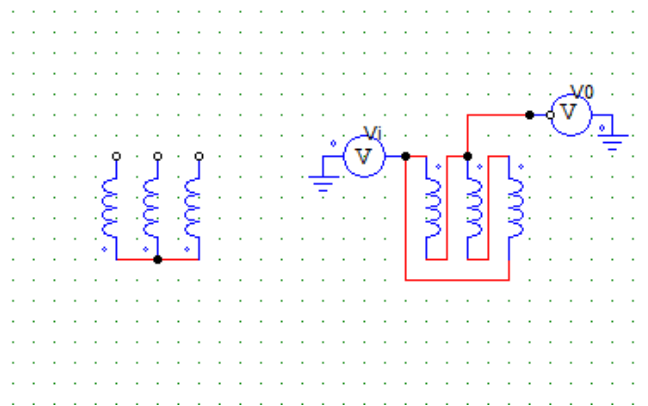
Figura B. 2. Funciones de transferencia para entrada de U, V y W con secundario en abierto. [Elaboración propia]



En la Command Window de Matlab se muestra:

- Entre datos "h\_prim\_inU\_secabto.txt" y "h\_prim\_inV\_secabto.txt"  
Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
99.9866  
Desviación típica  
0.0159
- Entre datos "h\_prim\_inV\_secabto" y "h\_prim\_inW\_secabto"  
Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
99.9929  
Desviación típica  
0.0116
- Entre datos "h\_prim\_inU\_secabto" y "h\_prim\_inW\_secabto"  
Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
99.9974  
Desviación típica  
0.0070

#### ***B.1.1.2 Configuración 2***



**Figura B. 3. Configuración 2 para medida de función de transferencia de entrada por fase U del secundario con primario en vacío. [Elaboración propia]**

En las siguientes fotografías se puede ver el cableado para la entrada por la fase U, V y W respectivamente:

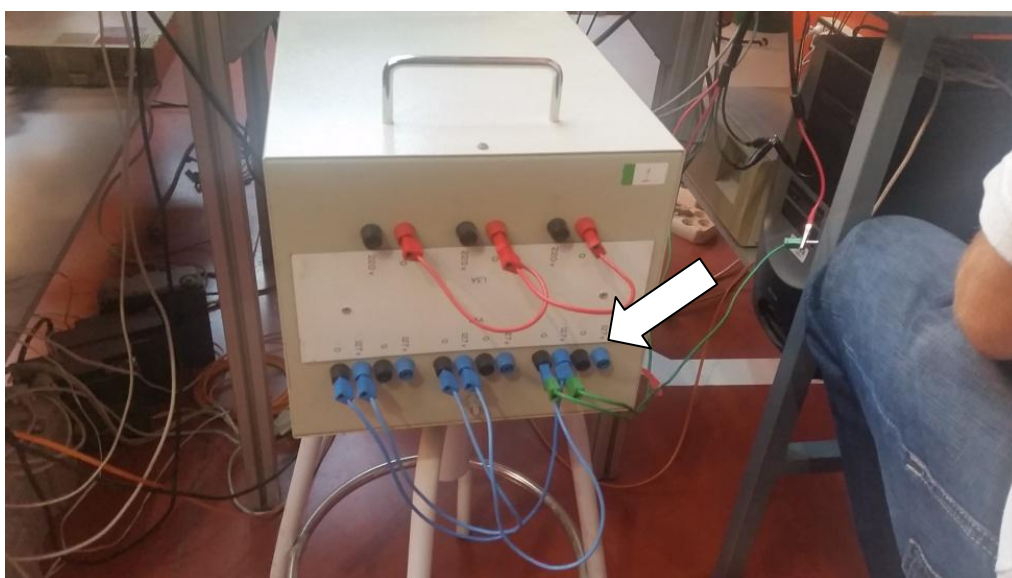
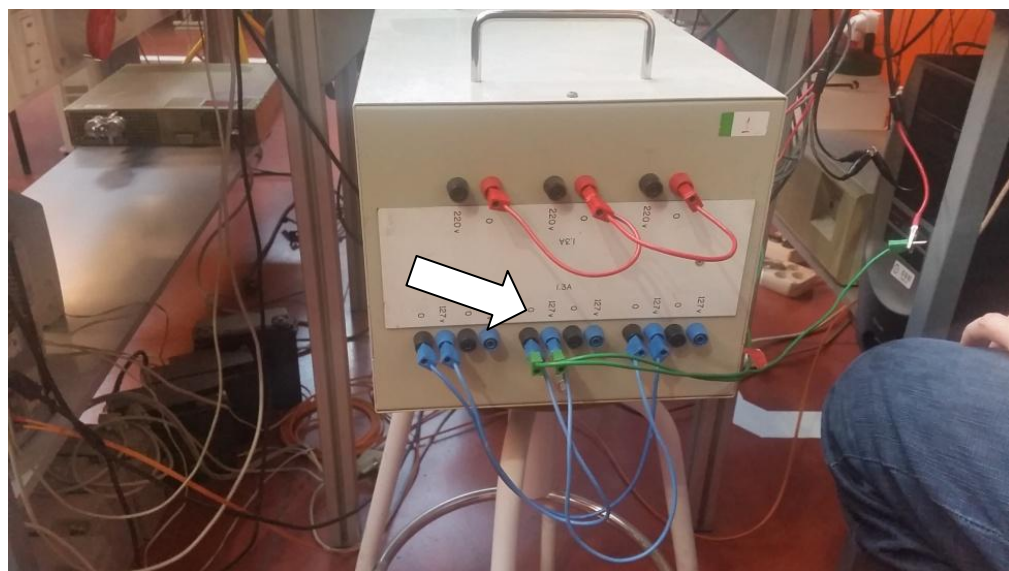
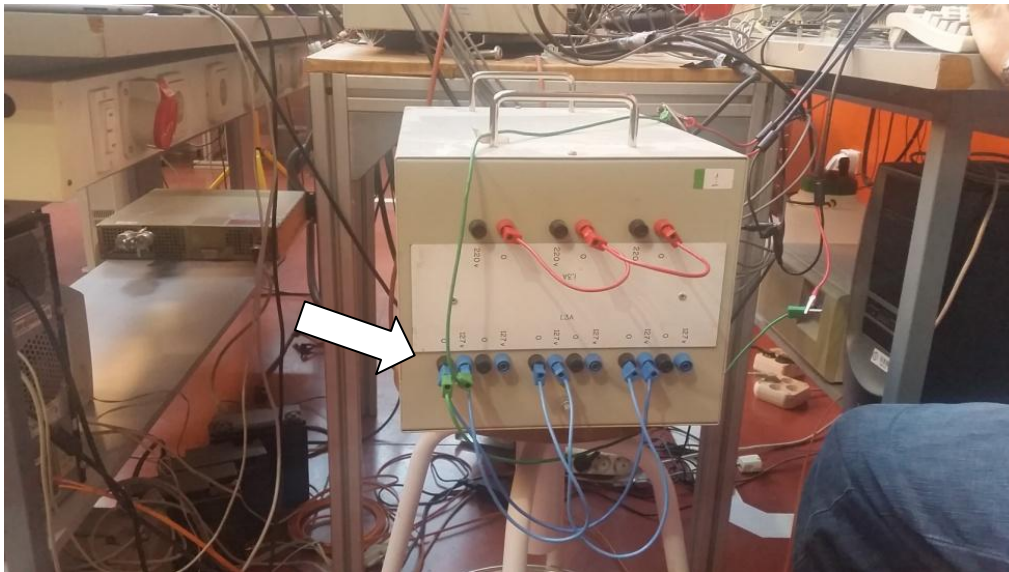


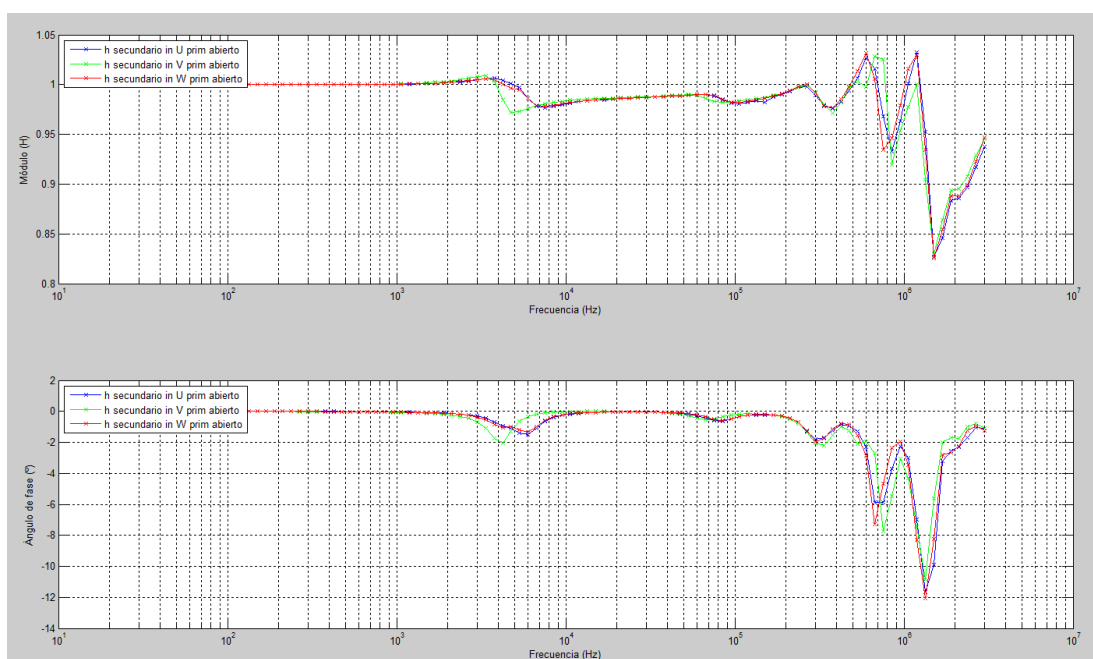
Figura B. 4. a) Entrada por fase U del secundario, b) entrada por fase V y c) entrada por fase W. [Elaboración propia]

Los parámetros del Solartron Analytical se mantuvieron exactamente igual que en la configuración anterior (1000 mV, 30 Hz-3MHz), y se seguirá manteniendo en estos valores para todas las tomas de datos de las funciones de transferencia.

Esta configuración generó unas funciones de transferencia que se obtienen con los datos de los ficheros:

- h\_sec\_inU\_primabto
- h\_sec\_inV\_primabto
- h\_sec\_inW\_primabto

En Matlab se obtuvieron las siguientes graficas. Como en la configuración anterior, se muestra primero cada función de transferencia de forma individual, después las tres en la misma gráfica y, por último, la desviación típica y correlación cruzada dos a dos:



**Figura B. 5. Funciones de transferencia de entrada por fase U, V y W del secundario con primario en vacío.**  
[Elaboración propia]

Los valores que arroja la Command Window son:

- Entre datos "h\_sec\_inU\_primabto.txt" y "h\_sec\_inV\_primabto.txt"

Coeficiente de correlación (en porcentaje)

99.9942

Desviación típica

0.0107

- Entre datos "h\_sec\_inV\_primabto" y "h\_sec\_inW\_primabto"

Coeficiente de correlación (en porcentaje)

99.9917

Desviación típica

0.0128

- Entre datos "h\_sec\_inU\_primabto" y "h\_sec\_inW\_primabto"
- Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
99.9987
- Desviación típica  
0.0052

### B.1.1.3. Configuración 3

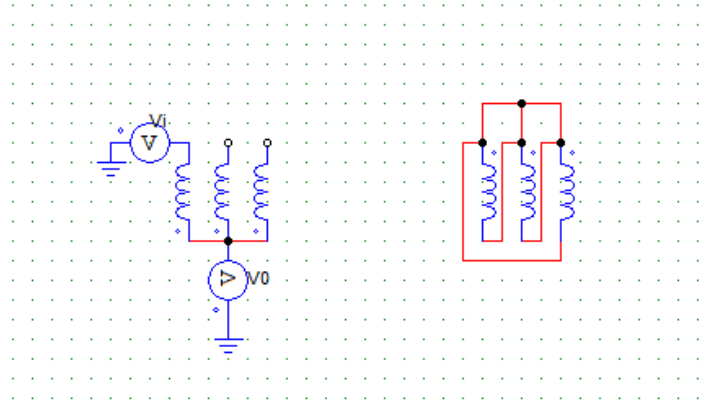


Figura B. 6. Configuración 3. Para función de transferencia para U en primario y secundario en cortocircuito.  
[Elaboración propia]

La conexión que se hizo en el laboratorio fue la siguiente:

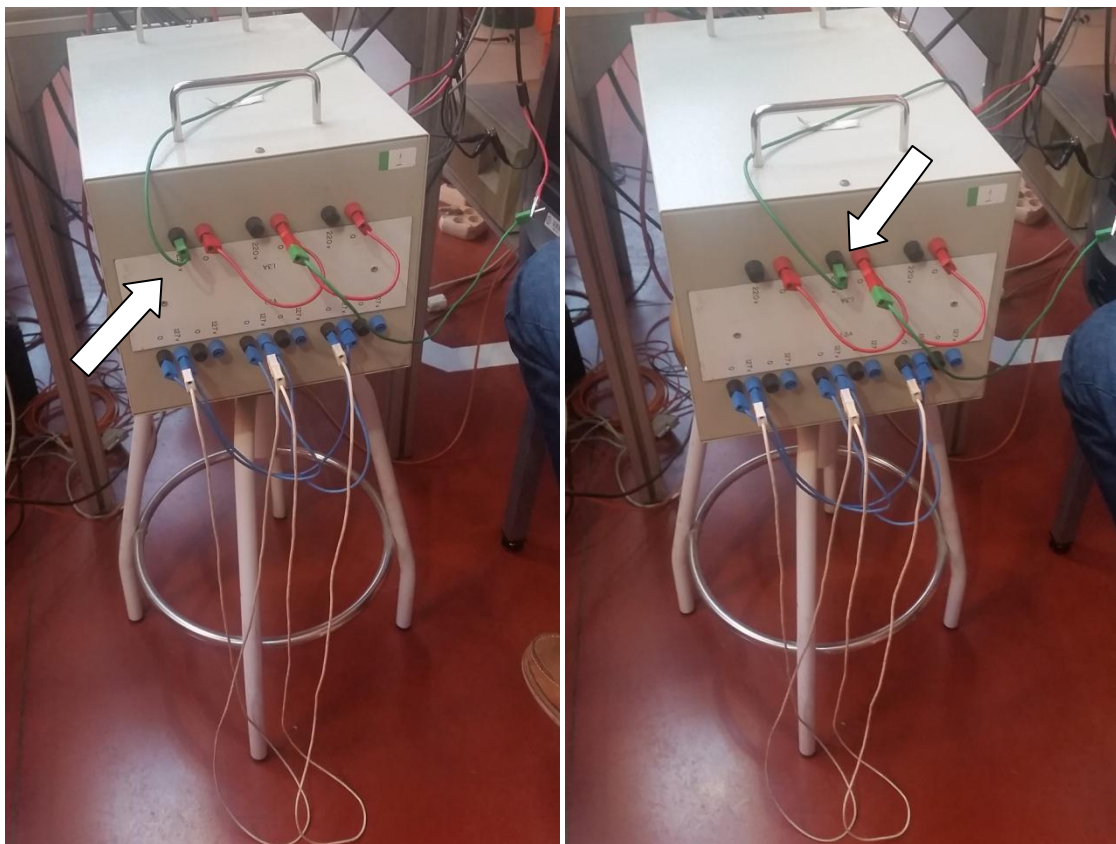
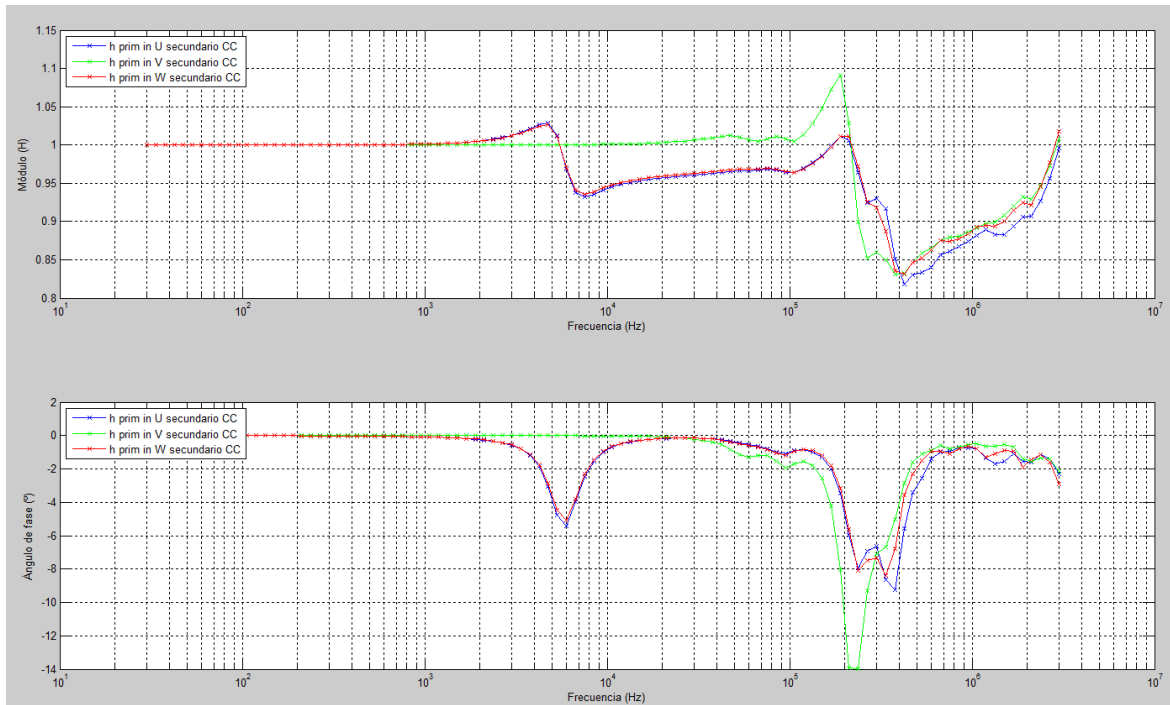


Figura B. 7. Fotografías del cableado en el laboratorio. En la primera imagen la alimentación es por U y en la segunda por V, ambas con secundario en CC. [Elaboración propia]

Estas medidas generaron tres funciones de transferencia cuyos ficheros son:

- h\_prim\_inU\_secCC
- h\_prim\_inV\_secCC
- h\_prim\_inW\_secCC



**Figura B. 8. Funciones de transferencia para entrada por U, V y W del primario con secundario en cortocircuito.**  
[Elaboración propia]

Los valores de desviación típica y correlación entre estas tres funciones de transferencia son:

- Entre datos "h\_prim\_inU\_secCC.txt" y "h\_prim\_inV\_secCC.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9533

Desviación típica

0.0333

- Entre datos "h\_prim\_inV\_secCC" y "h\_prim\_inW\_secCC"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9576

Desviación típica

0.0310

- Entre datos "h\_prim\_inU\_secCC" y "h\_prim\_inW\_secCC"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9970

Desviación típica

0.0080



#### B.1.1.4. Configuración 4

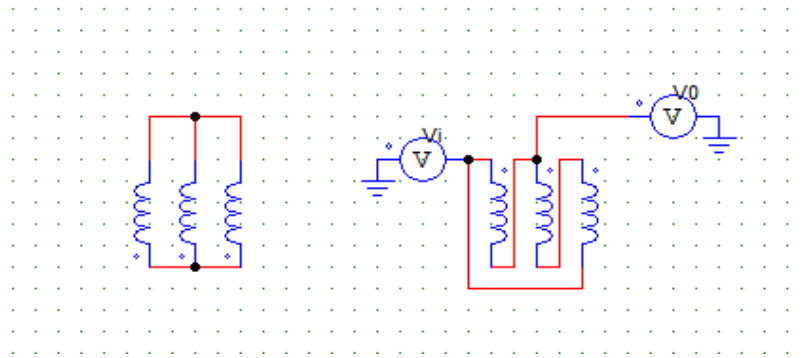


Figura B. 9. Configuración 4. Para función de transferencia con entrada en U, V y W del secundario con el primario en cortocircuito. [Elaboración propia]

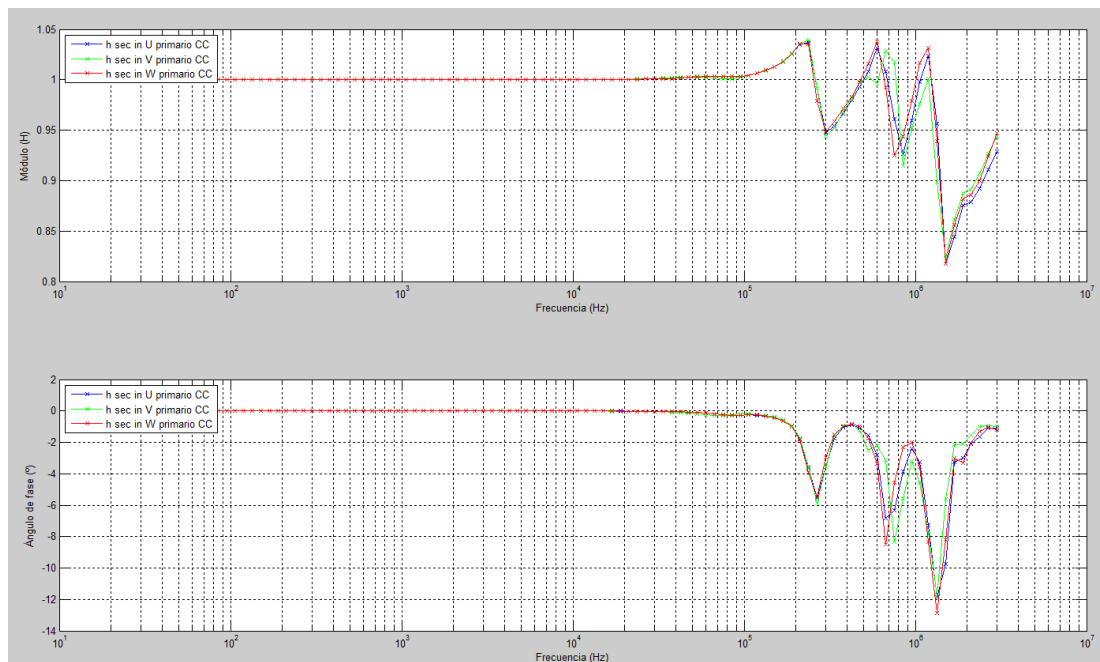


Figura B. 10. Configuración 4 en el laboratorio. En a) la entrada se hace por V y en b) por W, ambas con el primario en cortocircuito. [Elaboración propia]

La función de transferencia de cada uno de ellos se generó a través de los datos del barrido en frecuencia de los ficheros:

- $h_{\text{sec\_inU\_primCC}}$
- $h_{\text{sec\_inV\_primCC}}$
- $h_{\text{sec\_inW\_primCC}}$

Que en Matlab se visualiza como:



**Figura B. 11. Funciones de transferencia para entrada por U, V y W del secundario con el primario cortocircuito.**  
[Elaboración propia]

Cuantificando diferencias se obtiene:

- Entre datos "h\_sec\_inU\_primCC.txt" y "h\_sec\_inV\_primCC.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9946

Desviación típica

0.0104

- Entre datos "h\_sec\_inV\_primCC" y "h\_sec\_inW\_primCC"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9910

Desviación típica

0.0134

- Entre datos "h\_sec\_inU\_primCC" y "h\_sec\_inW\_primCC"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9980

Desviación típica

0.0064

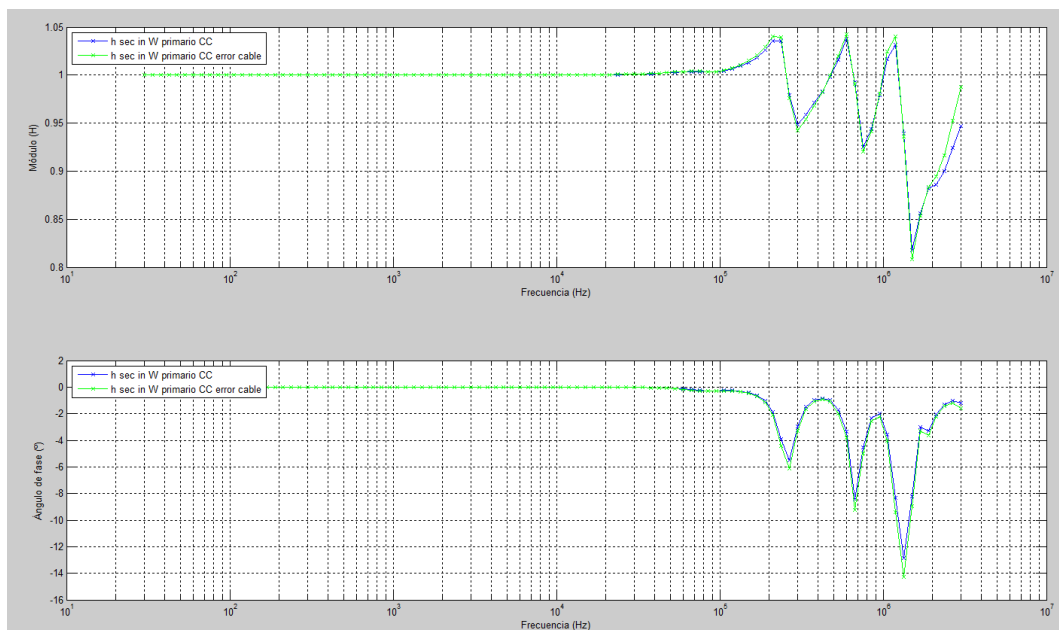
Para el caso del cable de diferente longitud:



**Figura B. 12.** El cable blanco conectado a la fase W del secundario se ha puesto en sustitución del verde que se había estado usando hasta el momento para la conexión. [Elaboración propia]

El fichero que generó fue:

- `h_sec_inW_primCC_errorcable`



**Figura B. 13.** Funciones de transferencia para entrada por W del secundario y primario en cortocircuito. Comparación de longitud de cables. [Elaboración propia]



- Entre datos "h\_sec\_inW\_primCC.txt" y "h\_sec\_inW\_primCC\_errorcable.txt"
- Coefficiente de correlación (en porcentaje)  
99.9946
- Desviación típica  
0.0105

#### B.1.1.5. Configuración 5

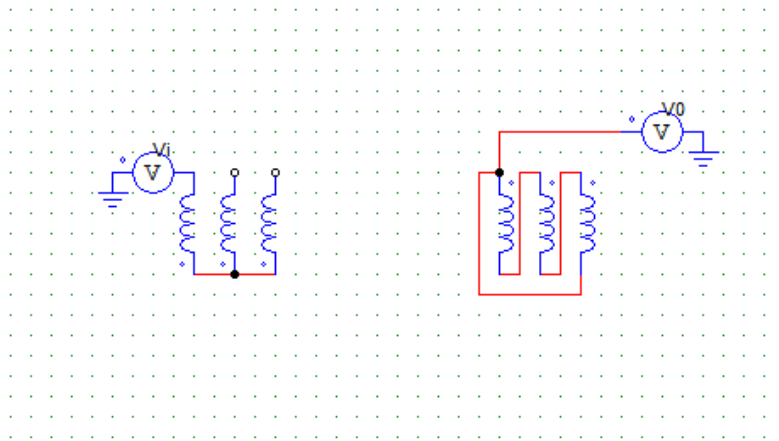


Figura B. 14. Configuración 5 para entrada por U, V y W del primario y salida por U, V y W del secundario.  
[Elaboración propia]

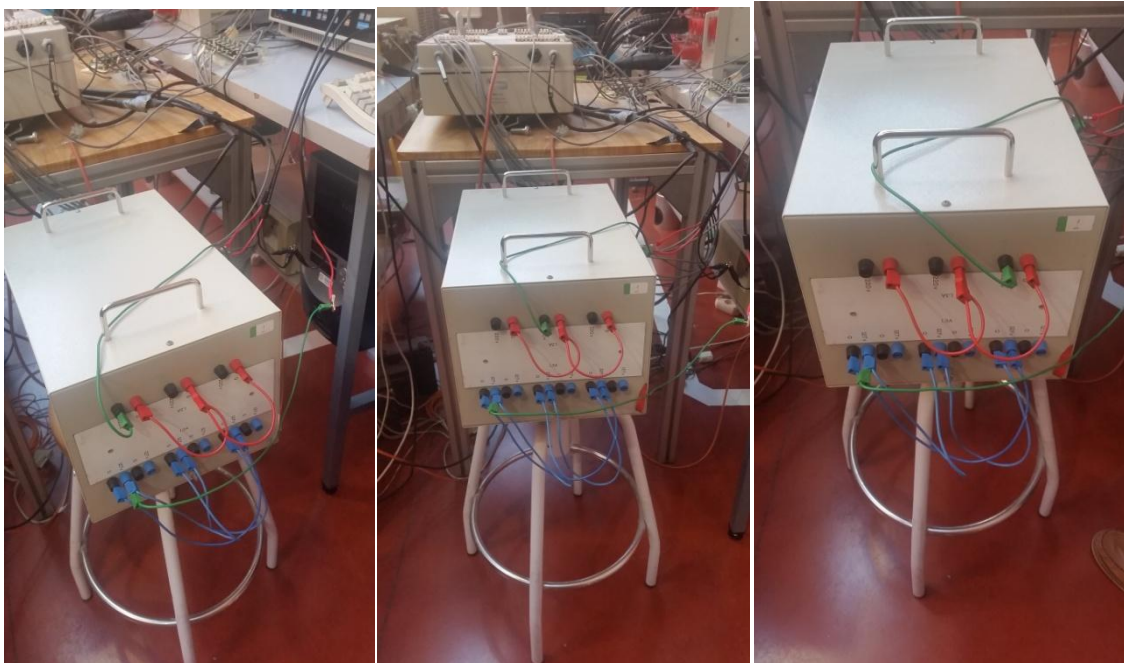


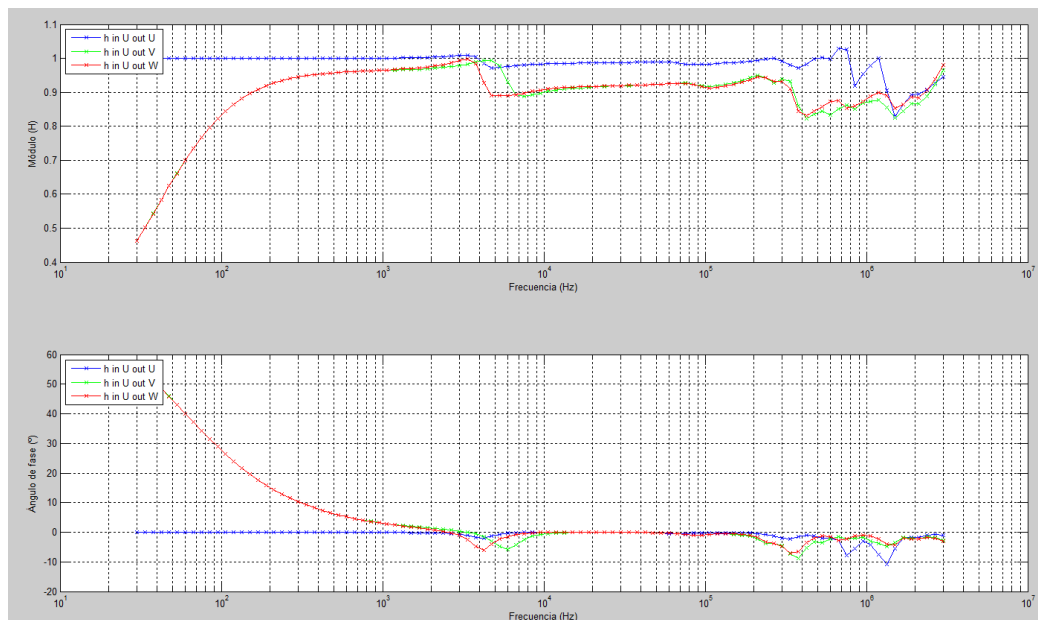
Figura B. 15. En las fotografías de muestra la entrada por U del primario y la salida por U, V y W del secundario.  
[Elaboración propia]

Esta configuración generó los siguientes archivos:

- h\_inU\_outU
- h\_inU\_outV
- h\_inU\_outW
- h\_inV\_outU
- h\_inV\_outV
- h\_inV\_outW
- h\_inW\_outU
- h\_inW\_outV
- h\_inW\_outW

A continuación se muestran las gráficas obtenidas en Matlab para cada una de las fases (de entrada):

- En U:



**Figura B. 16. Funciones de transferencia de entrada por fase U del primario y salida por U, V y W del secundario.**  
[Elaboración propia]

- Entre datos "h\_inU\_outU.txt" y "h\_inU\_outV.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.3437

Desviación típica

0.1405

- Entre datos "h\_inU\_outV" y "h\_inU\_outW"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9792

Desviación típica

0.0184

- Entre datos "h\_inU\_outU" y "h\_inU\_outW"

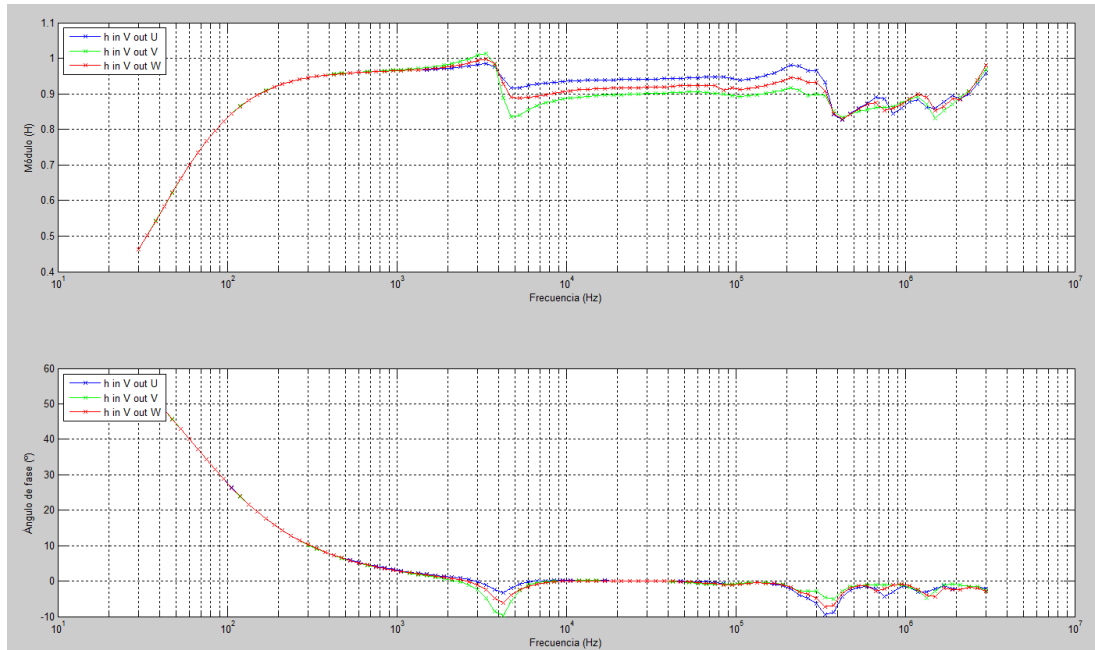
Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.3502

Desviación típica

0.1398

- Para la entrada por la fase V:



**Figura B. 17. Funciones de transferencia de entrada por V del primario y salida por U, V y W del secundario.**  
[Elaboración propia]

- Entre datos "h\_inV\_outU.txt" y "h\_inV\_outV.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9530

Desviación típica

0.0335

- Entre datos "h\_inV\_outV" y "h\_inV\_outW"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9878

Desviación típica

0.0168

- Entre datos "h\_inV\_outU" y "h\_inV\_outW"

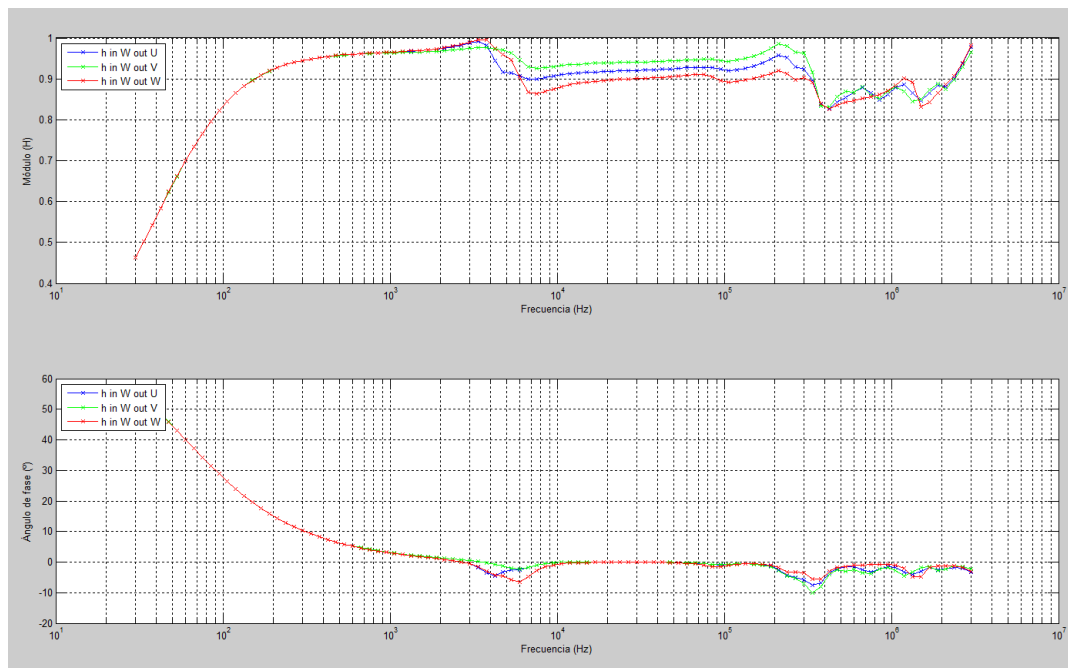
Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9855

Desviación típica

0.0182

- Para la entrada por la fase W:



**Figura B. 18. Funciones de transferencia para entrada por fase W del primario y salida por U, V y W del secundario. [Elaboración propia]**

- Entre datos "h\_inW\_outU.txt" y "h\_inW\_outV.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9870

Desviación típica

0.0171

- Entre datos "h\_inW\_outV" y "h\_inW\_outW"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9578

Desviación típica

0.0313

- Entre datos "h\_inW\_outU" y "h\_inW\_outW"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9842

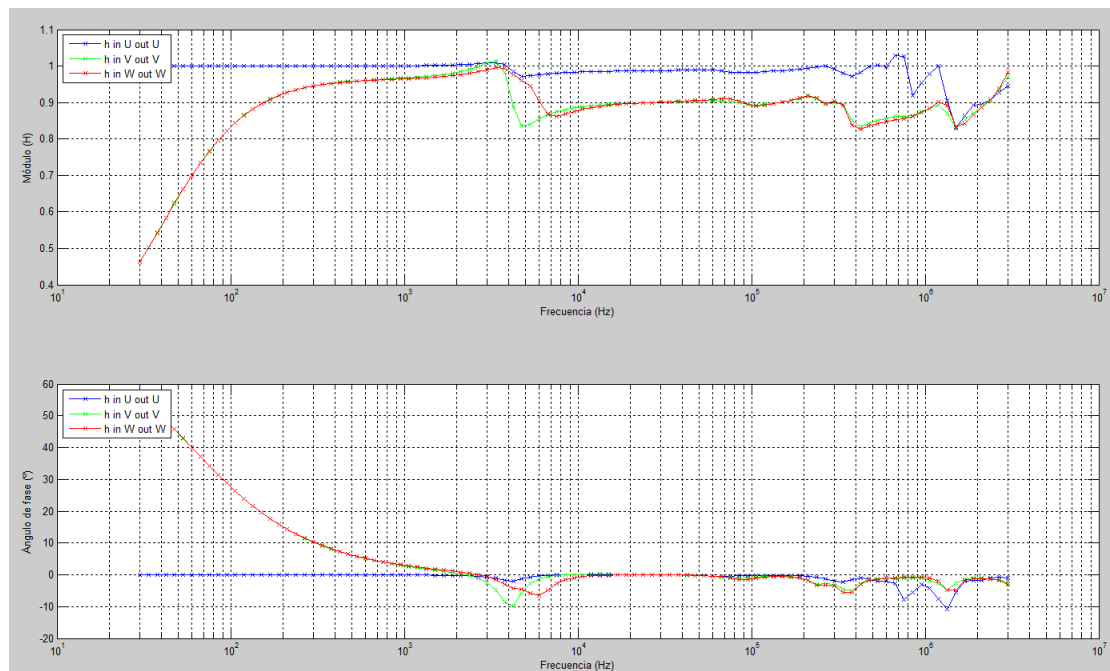
Desviación típica

0.0179

A continuación se comparan los tres barridos del caso en el que la entrada y la salida se hacen en la misma fase, es decir, los correspondientes a los ficheros

- h\_inU\_outU
- h\_inV\_outV
- h\_inW\_outW

Se obtuvieron las siguientes relaciones:



**Figura B. 19. Funciones de transferencia para entrada y salida por la misma fase. [Elaboración propia]**

- Entre datos "h\_inU\_outU.txt" y "h\_inV\_outV.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.3535

Desviación típica

0.1456

- Entre datos "h\_inV\_outV" y "h\_inW\_outW"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9755

Desviación típica

0.0199

- Entre datos "h\_inU\_outU" y "h\_inW\_outW"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.3479

Desviación típica

0.1445

### B.1.2. Impedancia

El cableado que se hizo en el laboratorio puede verse en las fotografías:



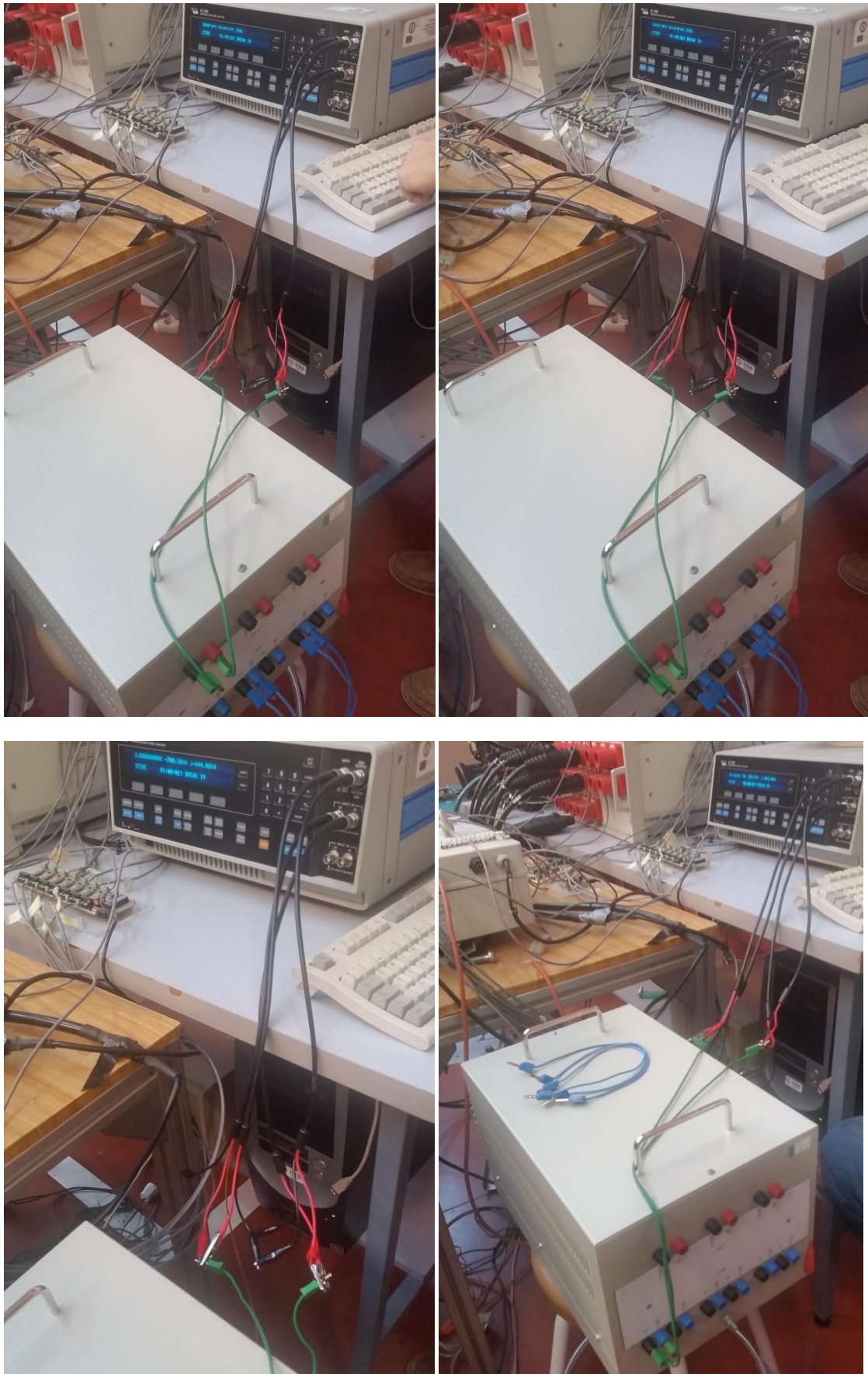


Figura B. 20. Conexiones en el laboratorio para la medida de las impedancias en el transformador 1. [Elaboración propia]

Las impedancias se midieron una a una, como se muestra:



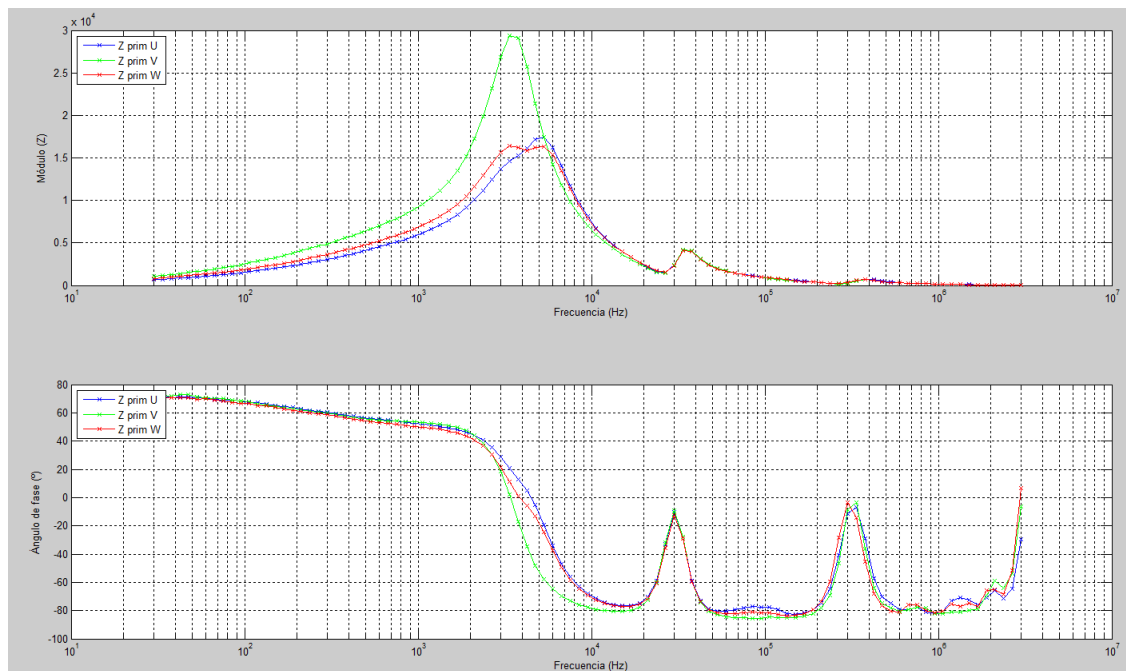
**Figura B. 21.** Se está midiendo la impedancia de la fase U del devanado primario. [Elaboración propia]

Los ficheros generados para las impedancias del transformador 1 fueron:

- $Z_{\text{prim\_U}}$
- $Z_{\text{prim\_V}}$
- $Z_{\text{prim\_W}}$
- $Z_{\text{sec\_U}}$
- $Z_{\text{sec\_V}}$
- $Z_{\text{sec\_W}}$

Primero se compararon las tres impedancias del primario, después las tres del secundario y para finalizar, las impedancias de la misma fase.

○ Primario:

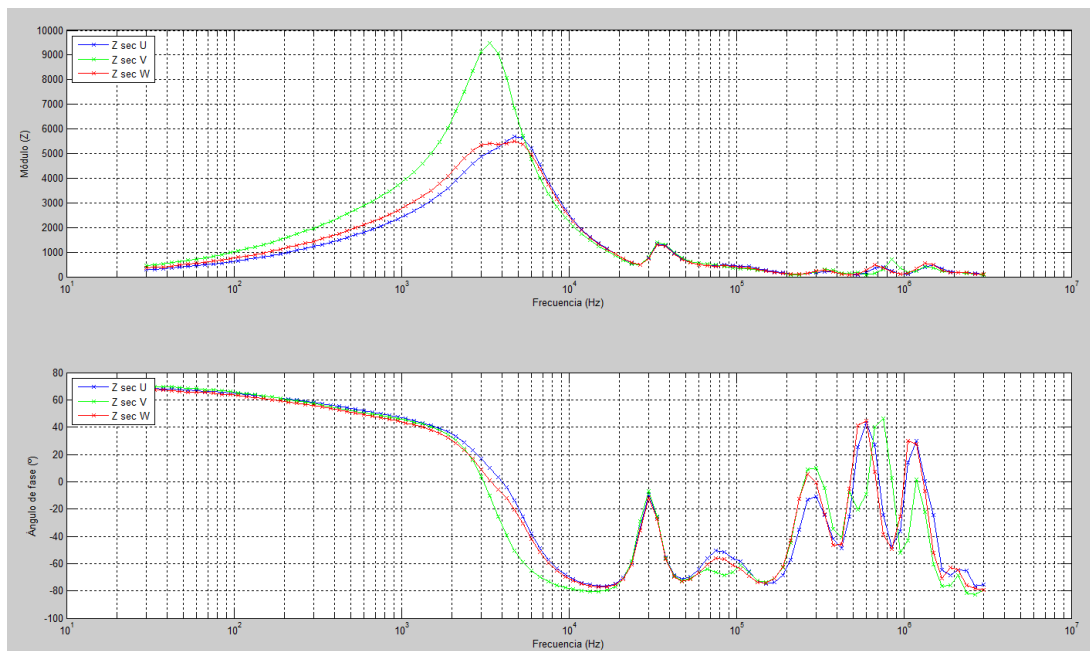


**Figura B. 22. Impedancias del devanado primario. [Elaboración propia]**

- Entre datos "Z\_prim\_U.txt" y "Z\_prim\_V.txt"  
 Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
 95.7193  
 Desviación típica  
 3.4083e+003
- Entre datos "Z\_prim\_V" y "Z\_prim\_W"  
 Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
 97.3850  
 Desviación típica  
 2.9451e+003
- Entre datos "Z\_prim\_U" y "Z\_prim\_W"  
 Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
 99.6083  
 Desviación típica  
 597.1236



- Devanado secundario:



**Figura B. 23. Impedancias del devanado secundario. [Elaboración propia]**

- Entre datos "Z\_sec\_U.txt" y "Z\_sec\_V.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

96.6844

Desviación típica

1.1493e+003

- Entre datos "Z\_sec\_V" y "Z\_sec\_W"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

97.9444

Desviación típica

995.3321

- Entre datos "Z\_sec\_U" y "Z\_sec\_W"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.6857

Desviación típica

197.4009

## B.2. Transformador 2

### B.2.1. Función de transferencia:

#### B.2.1.1. Configuración 1

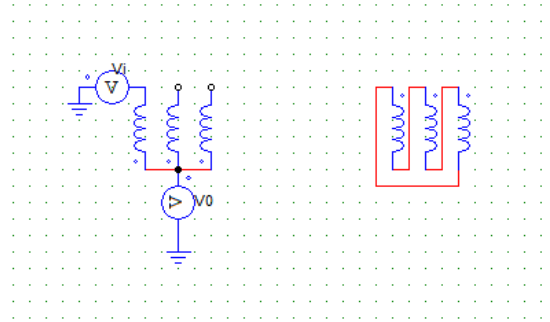


Figura B. 24. Configuración 1 para funciones de transferencia, entrada por las fases U, V y W del primario con salida en el neutro y secundario en vacío. [Elaboración propia]

De la configuración 1 para el transformador 2 se obtuvieron los siguientes ficheros para formar la función de transferencia  $H(\omega)$ :

- h2\_prim\_inU\_secabto
- h2\_prim\_inV\_secabto
- h2\_prim\_inW\_secabto

Matlab arroja la siguiente gráfica y valores para la desviación típica y correlación cruzada:

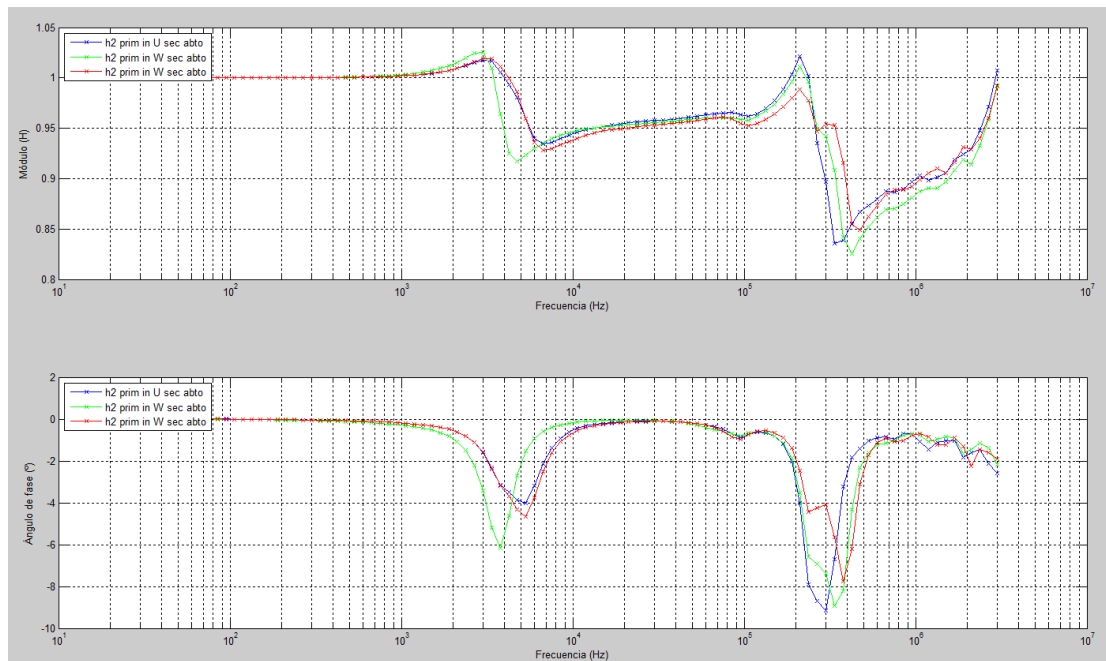


Figura B. 25. Funciones de transferencia para entrada por U, V y W del primario y secundario en vacío. [Elaboración propia]

- Entre datos "h2\_prim\_inU\_secabto.txt" y "h2\_prim\_inV\_secabto.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9874

Desviación típica

0.0158

- Entre datos "h2\_prim\_inV\_secabto" y "h2\_prim\_inW\_secabto"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9861

Desviación típica

0.0165

- Entre datos "h2\_prim\_inU\_secabto" y "h2\_prim\_inW\_secabto"

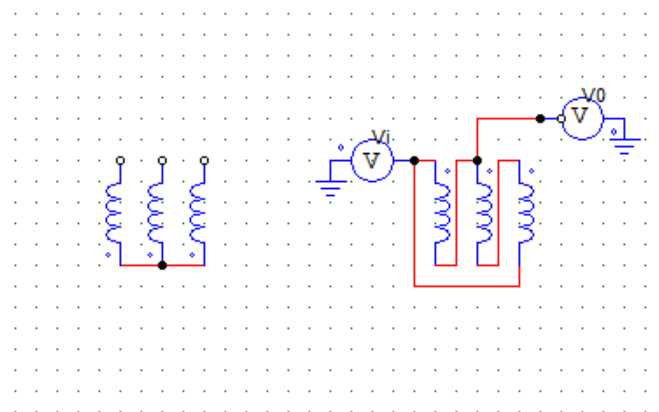
Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9852

Desviación típica

0.0167

### **B.2.1.2. Configuración 2**

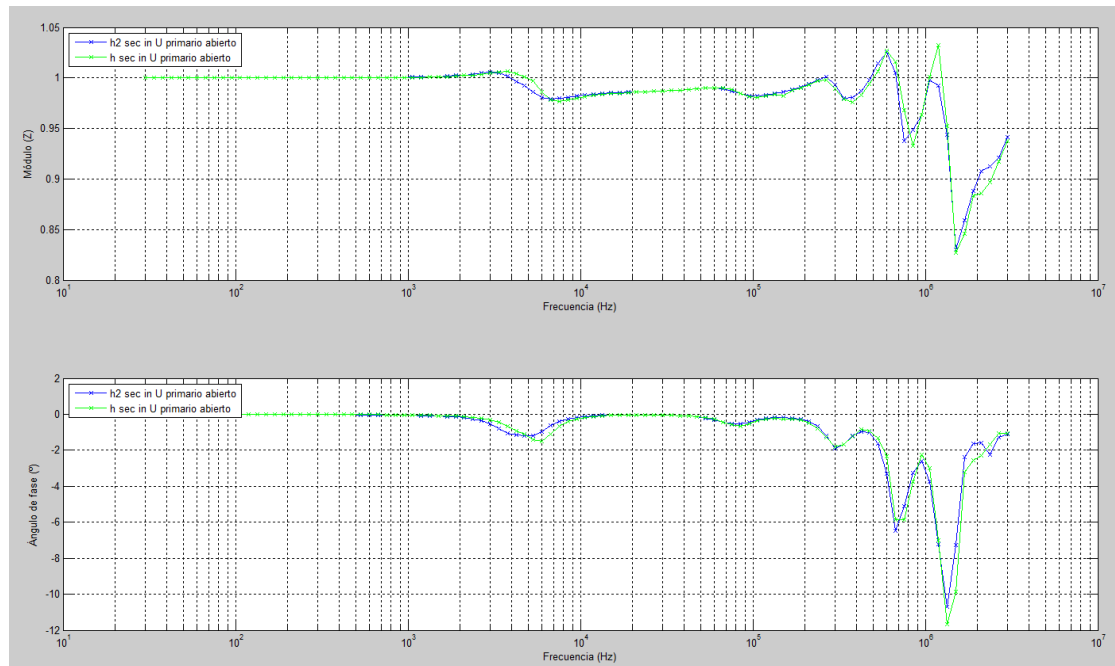


**Figura B. 26. Configuración 2. Entrada por las fases del secundario y primario en vacío. [Elaboración propia]**

El fichero que se generó fue:

- h2\_sec\_inU\_primabto

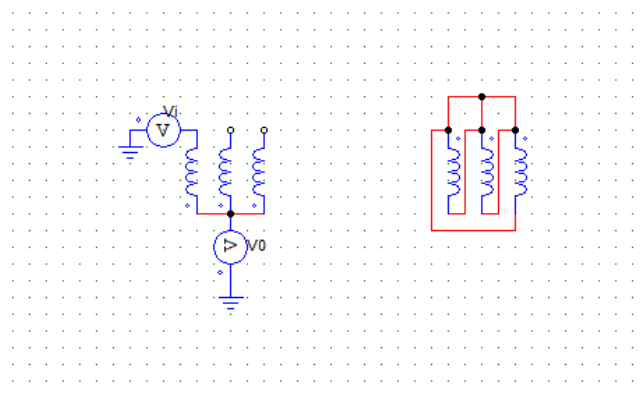
Se comparó con el obtenido para la misma configuración y fase del transformador 1, h\_sec\_inU\_primabto del primario, y se obtuvo:



**Figura B. 27. Funciones de transferencia para entrada por U del secundario con primario abierto del transformador 1 y del 2. [Elaboración propia]**

- Entre datos "h\_sec\_inU\_primabto.txt" y "h2\_sec\_inU\_primabto.txt"
- Coefficiente de correlación (en porcentaje)  
99.9932
- Desviación típica  
0.0115

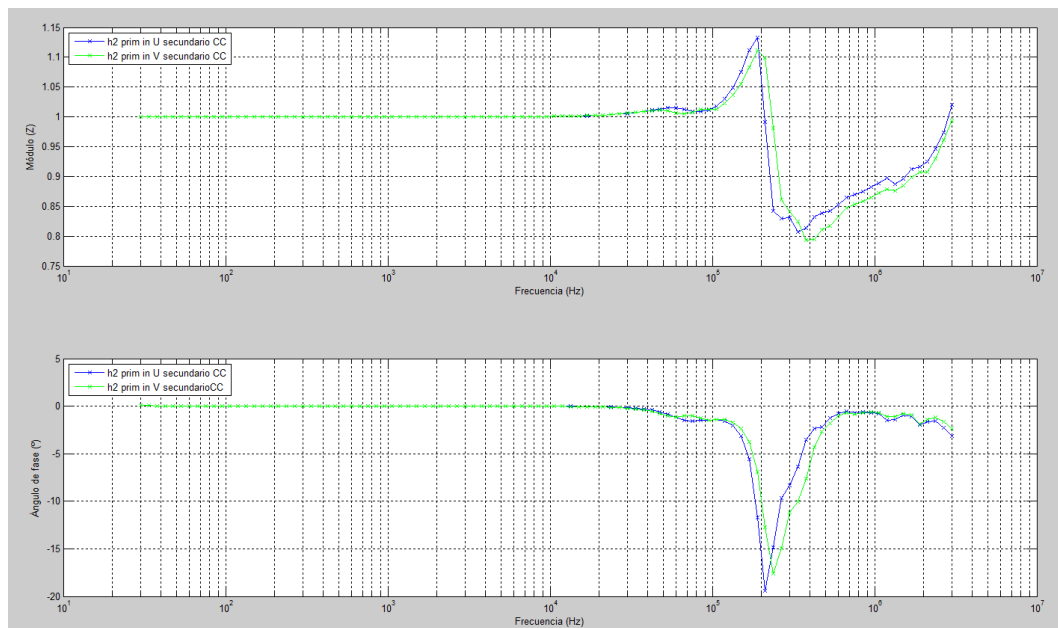
### **B.2.1.3. Configuración 3**



**Figura B. 28. Configuración 3. Entrada para las distintas fases del primario con el secundario en cortocircuito. [Elaboración propia]**

El barrido de frecuencia generó los ficheros para formar las funciones de transferencia:

- h2\_prim\_inU\_secCC
- h2\_prim\_inV\_secCC

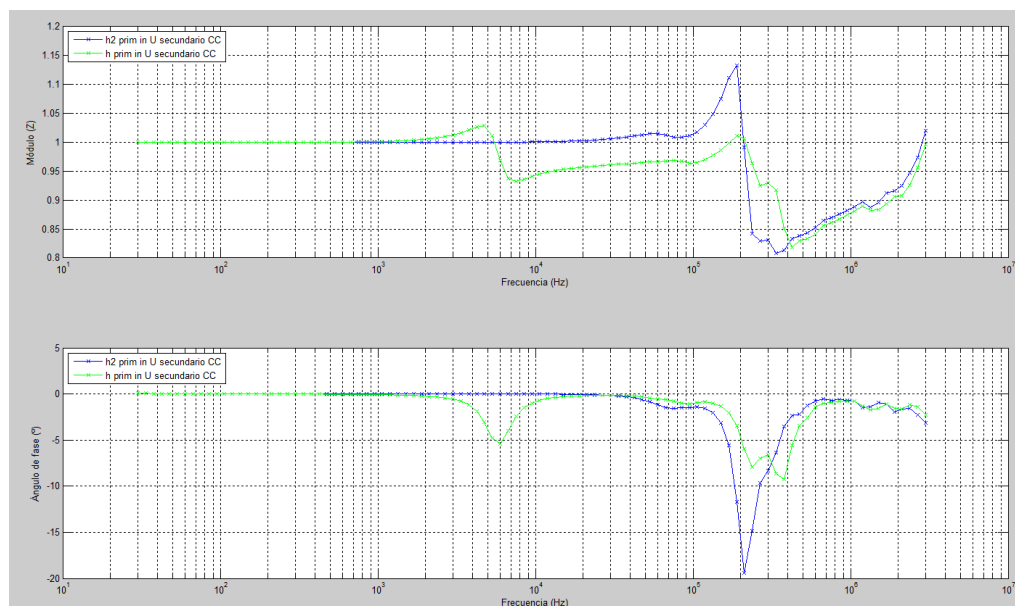


**Figura B. 29. Funciones de transferencia para entrada por U y V del primario con el secundario en cortocircuito. [Elaboración propia]**

- Entre datos "h2\_prim\_inU\_secCC.txt" y "h2\_prim\_inV\_secCC.txt"  
 Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
 99.7991  
 Desviación típica  
 0.0630

Después se comparó cada uno de estos ficheros con su correspondiente del transformador 1:

- h2\_prim\_inU\_secCC con h\_prim\_inU\_secCC:



**Figura B. 30. Funciones de transferencia de la configuración 3 para la entrada en U del T1 y el T2. [Elaboración propia]**

- Entre datos "h\_prim\_inU\_secCC.txt" y "h2\_prim\_inU\_secCC.txt"

Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
99.8039

Desviación típica  
0.0621

- h2\_prim\_inV\_secCC con h\_prim\_inV\_secCC:

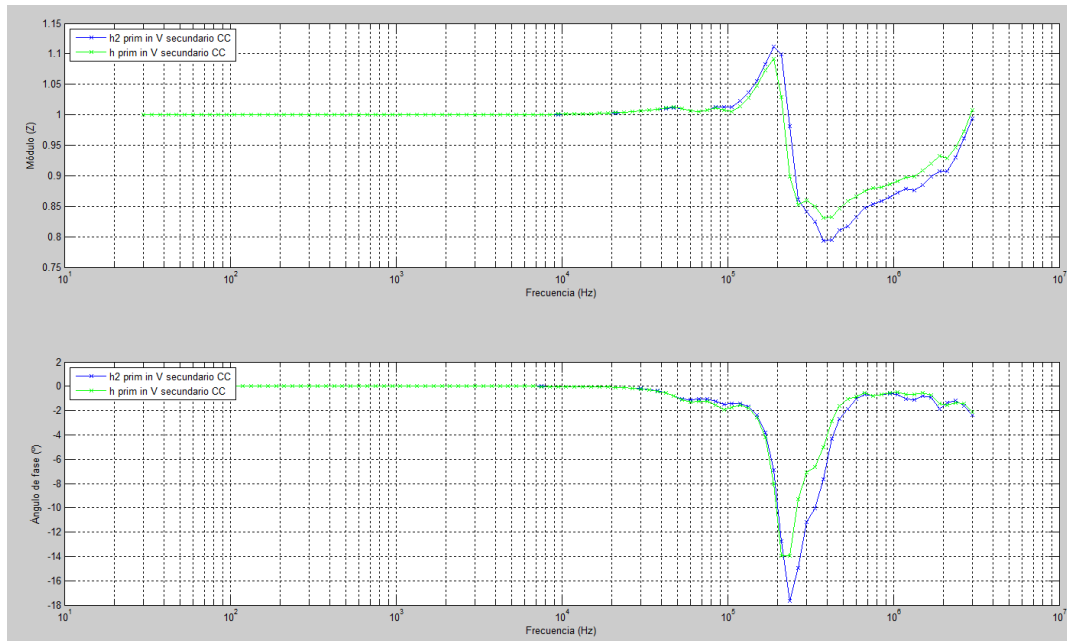


Figura B. 31. Funciones de transferencia de la configuración 3 para la entrada en V del T1 y el T2. [Elaboración propia]

- Entre datos "h\_prim\_inV\_secCC.txt" y "h2\_prim\_inV\_secCC.txt"

Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
99.7991

Desviación típica  
0.0630

#### B.2.1.4. Configuración 4

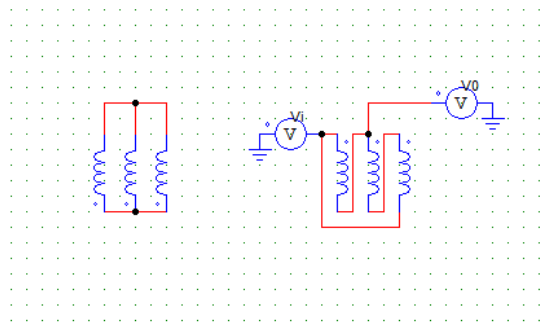
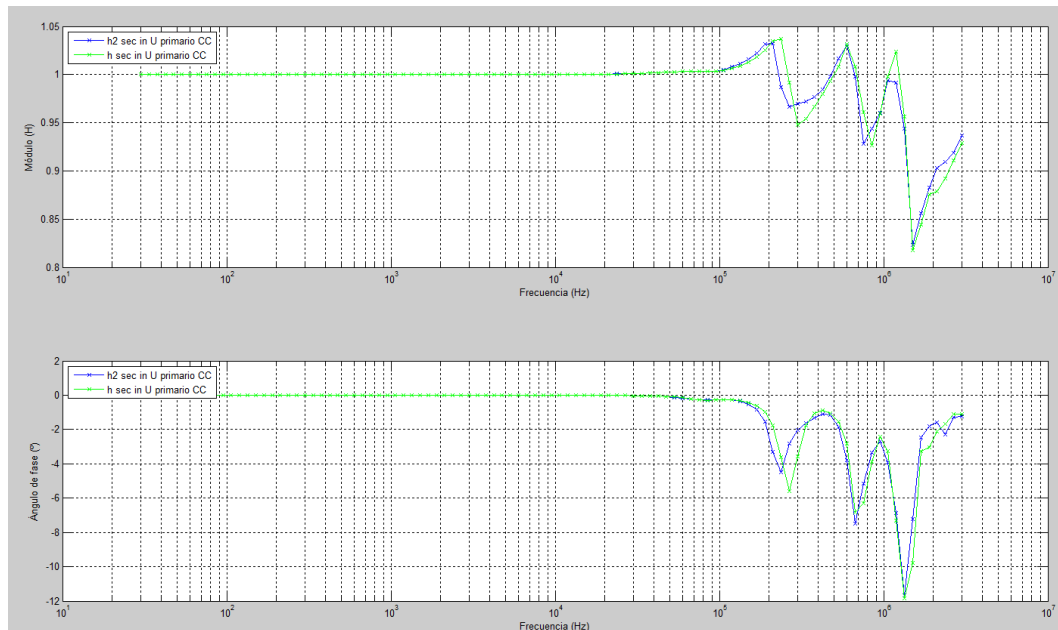


Figura B. 32. Configuración 4. Entrada por las fases del secundario con el primario en cortocircuito. [Elaboración propia]

Después del barrido, Solartron generó el siguiente fichero:

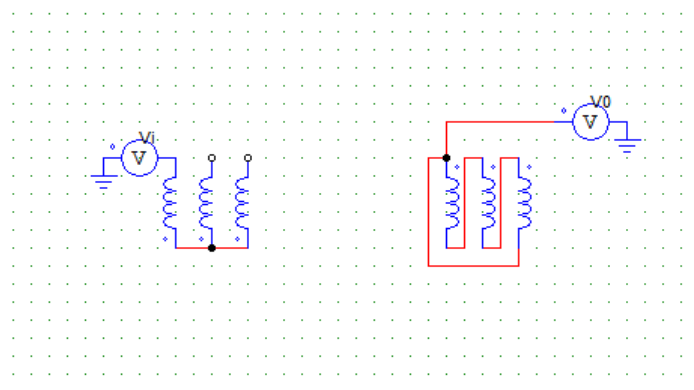
- h2\_sec\_inU\_primCC



**Figura B. 33. Funciones de transferencia para Configuración 4 con entrada en U del secundario para T1 y T2**

- Entre datos "h\_sec\_inU\_primCC.txt" y "h2\_sec\_inU\_primCC.txt"
- Coefficiente de correlación (en porcentaje)  
99.9854
- Desviación típica  
0.0178

### B.2.1.5. Configuración 5

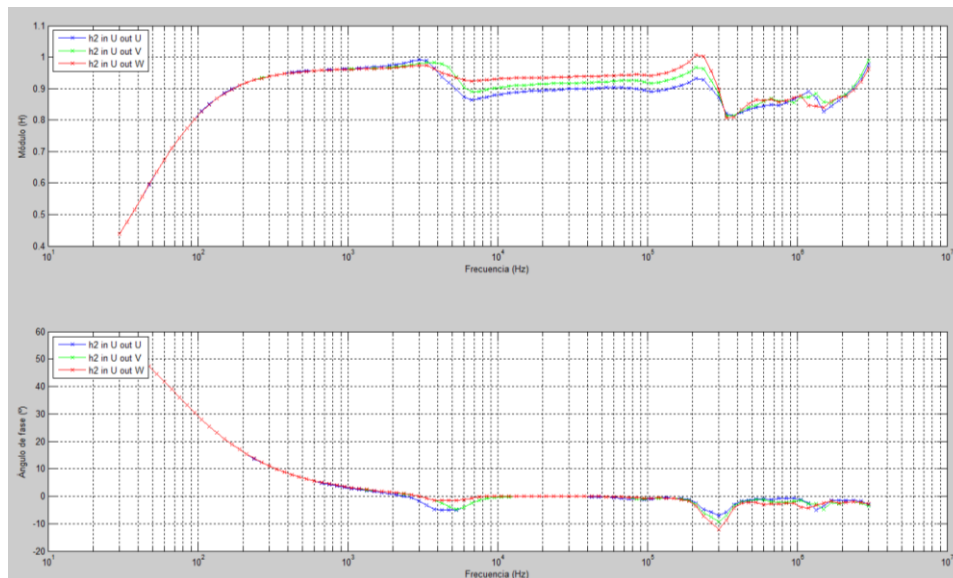


**Figura B. 34. Configuración 5. Entrada por las fases del primario y salida por las fases del secundario. [Elaboración propia]**

Los ficheros generados para cada una de las fases con sus tres combinaciones en las salidas son:

- Fase de entrada U:

- h2\_inU\_outU
- h2\_inU\_outV
- h2\_inU\_outW



**Figura B. 35. Funciones de transferencia para configuración 5 con la entrada en U del primario y salida en U, V y W del secundario. [Elaboración propia]**

- Entre datos "h2\_inU\_outU.txt" y "h2\_inU\_outV.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9880

Desviación típica

0.0173

- Entre datos "h2\_inU\_outV" y "h2\_inU\_outW"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9850

Desviación típica

0.0169

- Entre datos "h2\_inU\_outU" y "h2\_inU\_outW"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9600

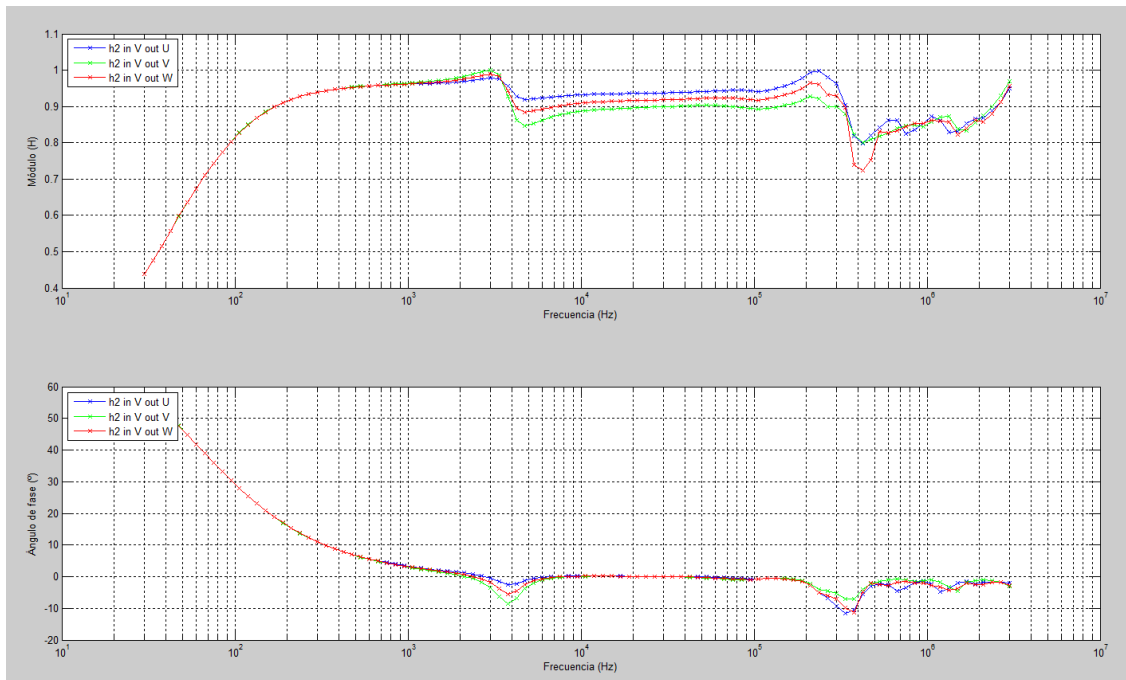
Desviación típica

0.0305

- Para la fase de entrada V:

- h2\_inV\_outU
- h2\_inV\_outV
- h2\_inV\_outW





**Figura B. 36. Funciones de transferencia para configuración 5 con la entrada en V del primario y salida en U, V y W del secundario. [Elaboración propia]**

- Entre datos "h2\_inV\_outU.txt" y "h2\_inV\_outV.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9523

Desviación típica

0.0332

- Entre datos "h2\_inV\_outV" y "h2\_inV\_outW"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9741

Desviación típica

0.0213

- Entre datos "h2\_inV\_outU" y "h2\_inV\_outW"

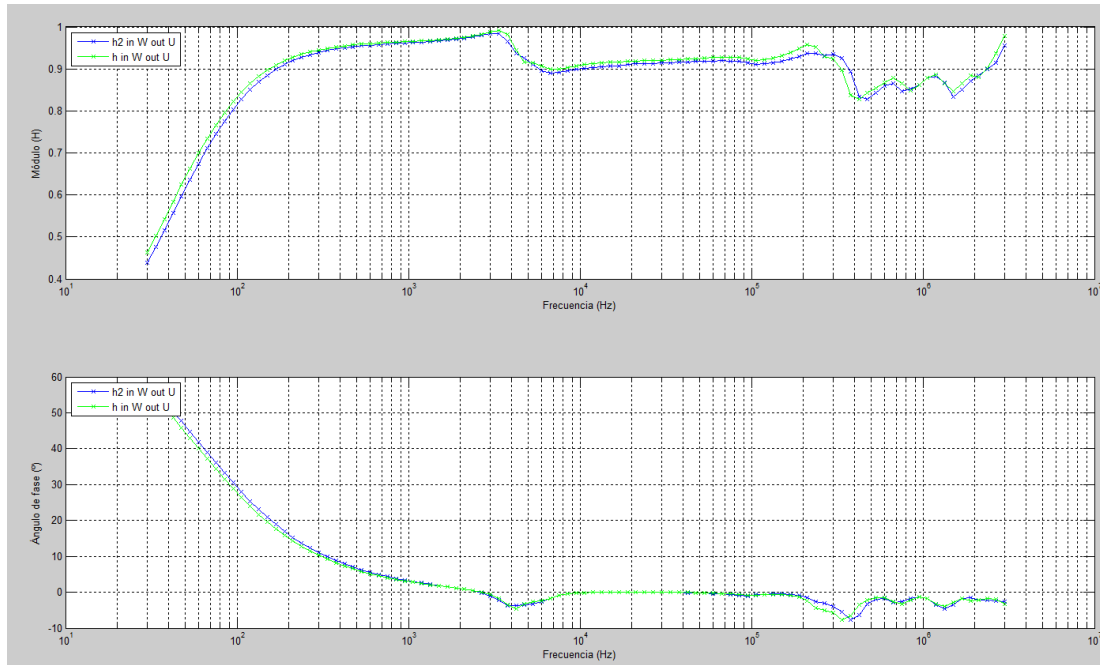
Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9799

Desviación típica

0.0214

- Para entrada por la fase W, con su homólogo del transformador 1:
- h2\_inW\_outU



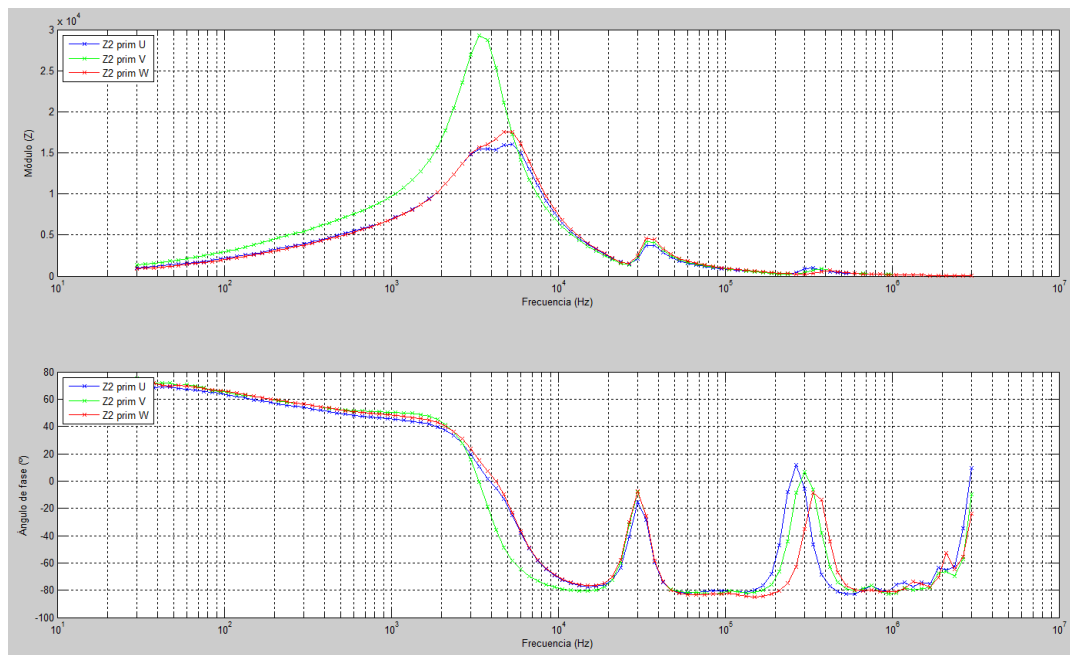
**Figura B. 37. Funciones de transferencia para configuración 5 con la entrada en W del primario y salida en U, V y W del secundario. [Elaboración propia]**

- Entre datos "h\_inW\_outU.txt" y "h2\_inW\_outU.txt"
- Coefficiente de correlación (en porcentaje)  
99.9740
- Desviación típica  
0.0219

### B.2.2. Impedancias

- Z2\_prim\_U
- Z2\_prim\_V
- Z2\_prim\_W
- Z2\_sec\_U
- Z2\_sec\_V
- Z2\_sec\_W

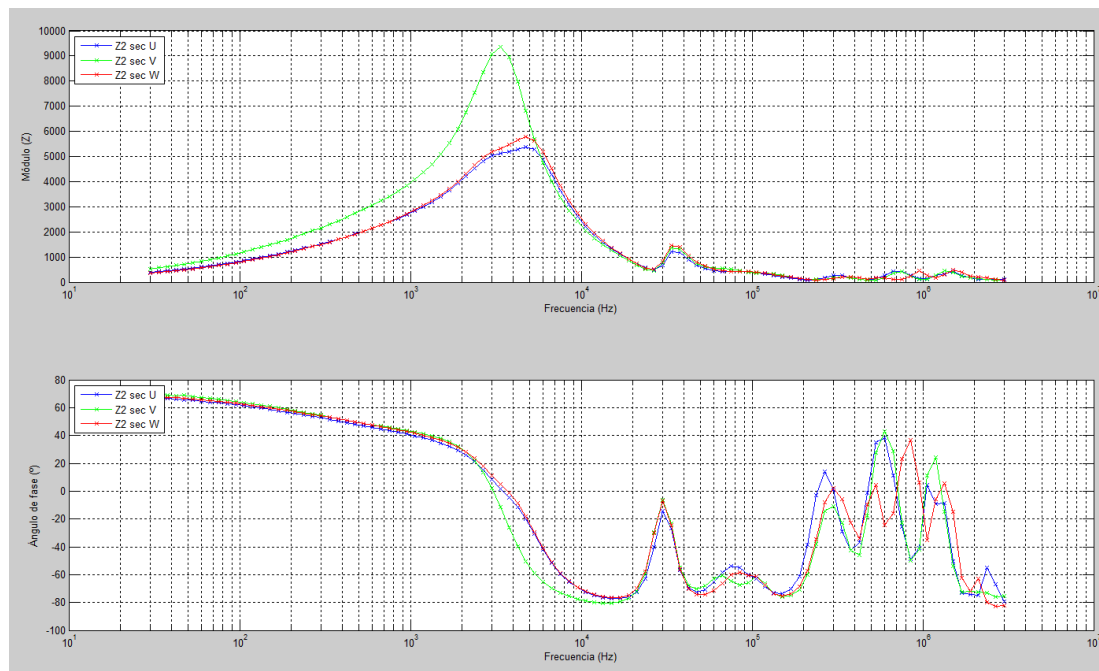
- Se comparan primero las tres fases del devanado primario:



**Figura B. 38. Impedancias del devanado primario del transformador 2. [Elaboración propia]**

- Entre datos "Z2\_prim\_U.txt" y "Z2\_prim\_V.txt"  
Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
97.2044  
Desviación típica  
3.1884e+003
- Entre datos "Z2\_prim\_V" y "Z2\_prim\_W"  
Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
96.6125  
Desviación típica  
3.1232e+003
- Entre datos "Z2\_prim\_U" y "Z2\_prim\_W"  
Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
99.8782  
Desviación típica  
378.0877

Para las tres fases del secundario:



**Figura B. 39. Impedancias del devanado secundario del transformador 2. [Elaboración propia]**

- Entre datos "Z2\_sec\_U.txt" y "Z2\_sec\_V.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

97.8190

Desviación típica

1.0719e+003

- Entre datos "Z2\_sec\_V" y "Z2\_sec\_W"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

97.5418

Desviación típica

1.0249e+003

- Entre datos "Z2\_sec\_U" y "Z2\_sec\_W"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9134

Desviación típica

122.1788

Por último, se van a comparar las impedancias del transformador 1 con las del transformador 2, cada una con su fase del devanado correspondiente:

- Primario:
- Fase U:

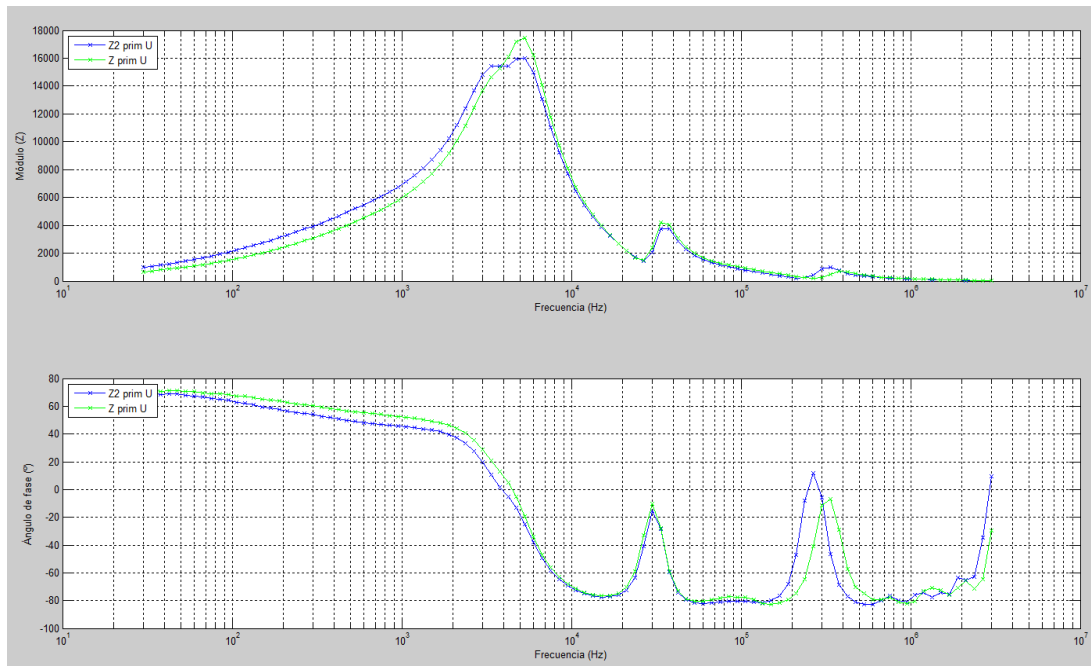


Figura B. 40. Impedancias de la fase U del primario del T1 y T2. [Elaboración propia]

- Entre datos "Z2\_prim\_U.txt" y "Z\_prim\_U.txt"  
Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
98.5792  
Desviación típica  
3.8173e+003

- Fase V:

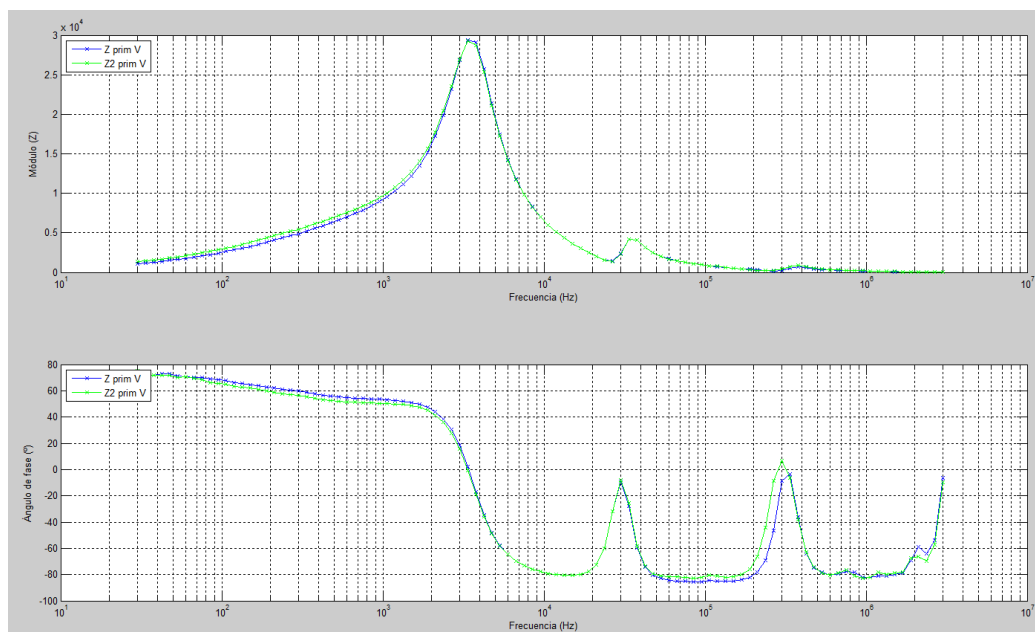


Figura B. 41. Impedancias de la fase V del primario para el T1 y el T2. [Elaboración propia]

- Entre datos "Z2\_prim\_V.txt" y "Z\_prim\_V.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

99.9585

Desviación típica

6.5540e+003

- Fase W:

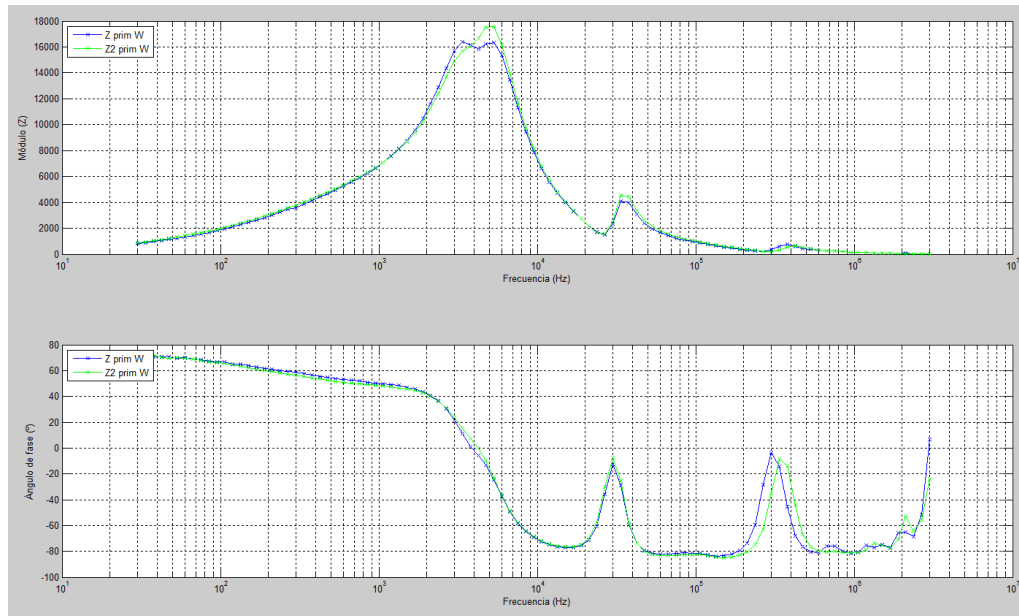


Figura B. 42. Impedancias de la fase W del primario para el T1 y el T2. [Elaboración propia]

- Entre datos "Z2\_prim\_W.txt" y "Z\_prim\_W.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)

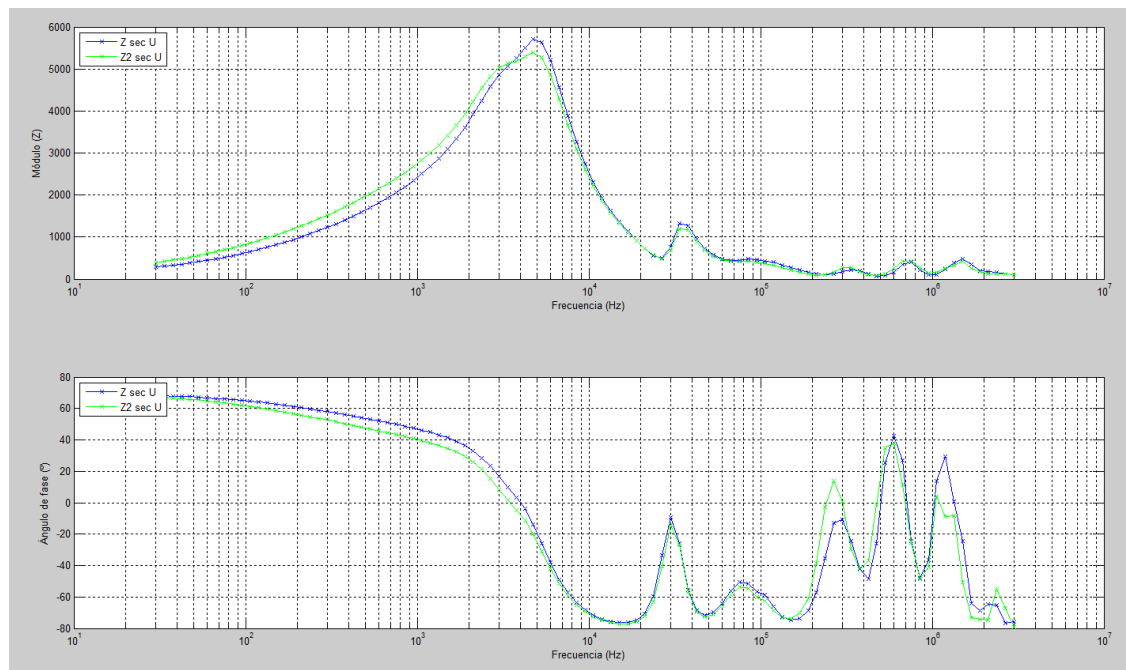
99.4568

Desviación típica

4.0564e+003

- Secundario:

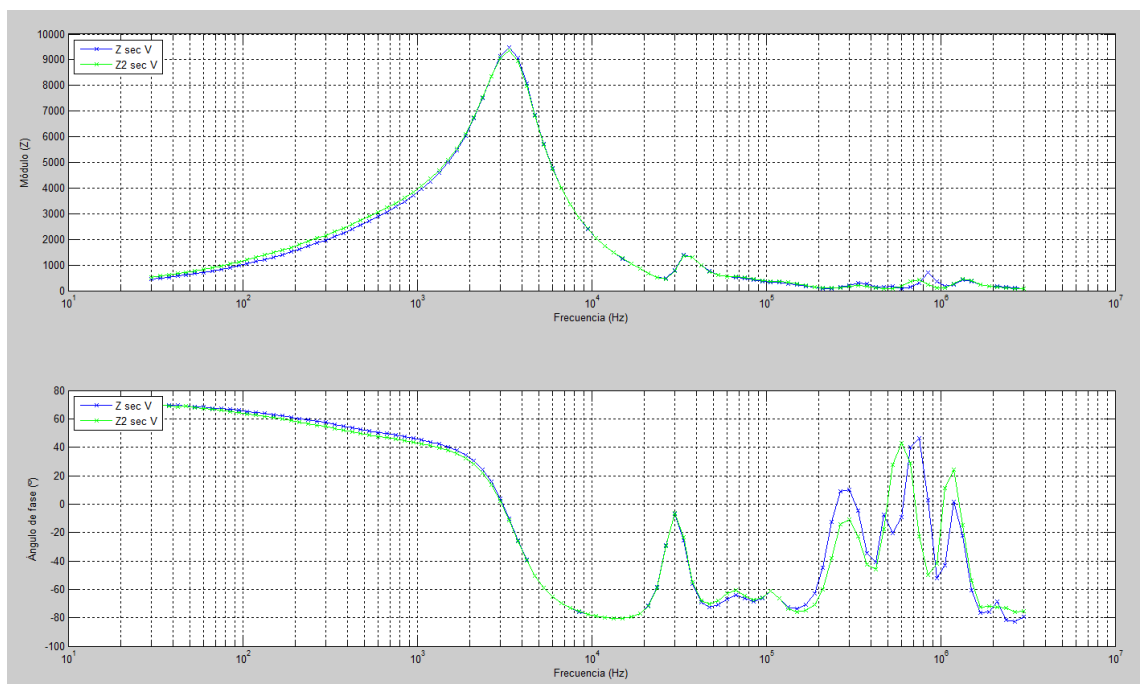
- Fase U:



**Figura B. 43. Impedancias de la fase U del secundario para el T1 y el T2. [Elaboración propia]**

- Entre datos "Z2\_sec\_U.txt" y "Z\_sec\_U.txt"  
Coeficiente de correlación (en porcentaje)  
99.6207  
Desviación típica  
188.6503

- Fase V:



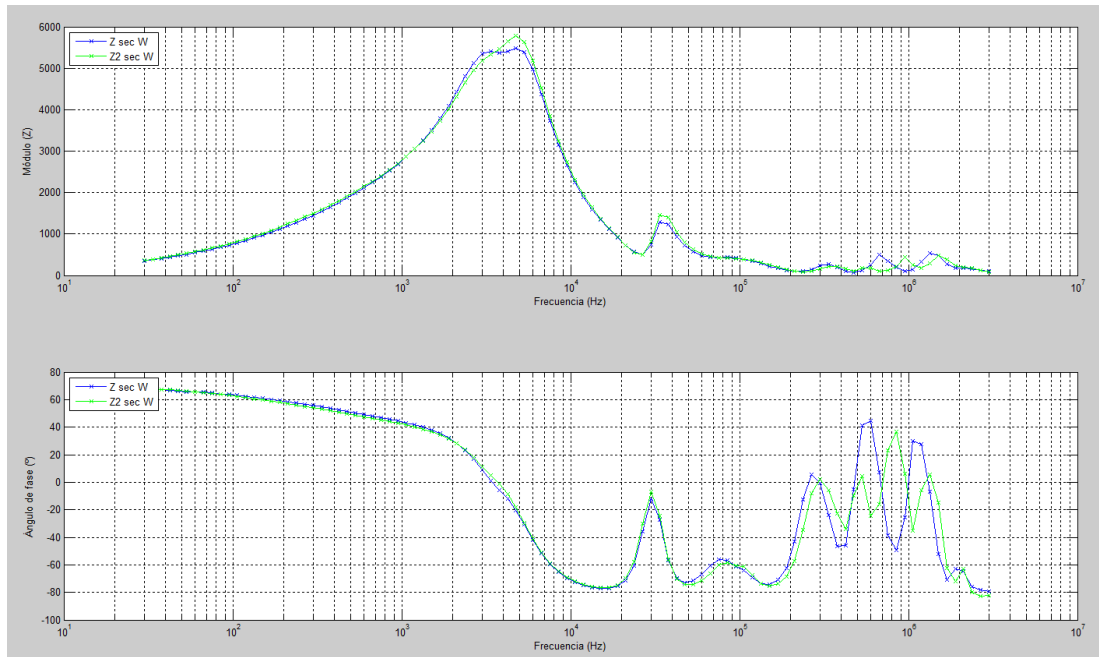
**Figura B. 44. Impedancias de la fase U del secundario para el T1 y el T2. [Elaboración propia]**

- Entre datos "Z2\_sec\_V.txt" y "Z\_sec\_V.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)  
99.6963

Desviación típica  
1.0556e+003

- Fase W:



**Figura B. 45. Impedancias de la fase W del secundario para el T1 y el T2. [Elaboración propia]**

- Entre datos "Z2\_sec\_V.txt" y "Z\_sec\_V.txt"

Coefficiente de correlación (en porcentaje)  
99.9494

Desviación típica  
88.6259